

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Том XX



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 2005

УДК 551.510.42

Редакционная коллегия: академик РАН, проф. Ю. А. Израэль (председатель); д-р физ.-мат. наук, проф. С. М. Семенов (зам. председателя); д-р биол. наук, проф. В. А. Абакумов; канд. биол. наук Г. Э. Инсаров; канд. биол. наук В. В. Ясюкевич (ответственный секретарь)

Адрес: Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б
Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Факс: (7 095) 1600831 Тел.: (7 095) 1691103

Все статьи данного сборника рецензируются.

Editorial Board: Member of the Russian Academy of Sciences, Prof. Yu. A. Izrael (Chairman); Prof. S. M. Semenov (Vice-Chairman); Prof. V. A. Abakumov; Dr. G. E. Insarov; Dr. V. V. Yasyukevich (Executive Secretary)

Address: 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia
Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS
Fax: (7 095) 1600831 Phone: (7 095) 1691103

All papers published in this book are peer-reviewed.

Представлены работы, посвященные мониторингу и оценке ответной реакции экосистем на антропогенные воздействия регионального, континентального и глобального масштабов, в том числе на загрязнение атмосферы и изменения климата. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований, а также математические модели экологических процессов.

Для климатологов, биологов и экологов широкого профиля.

The issues of monitoring and assessment of ecosystem response to anthropogenic impacts of regional, continental and global scale, in particular, to air pollution and climate change, are considered. The results of experimental studies as well as mathematical models of ecological processes are presented.

The book is of interest for climatologists, biologists and environmentalists.

СОДЕРЖАНИЕ

К юбилею академика Ю. А. Израэля	10
<i>О. Соломина, Г. Джакоби, Р. Дарриго, А. Браунинг, Н. Еременко, Я. Муравьев.</i> Реконструкции летних температур на Камчатке и на острове Кунашир по дендрохронологическим данным за последние 400 лет.	37
<i>О. В. Сидорова, М. М. Наурзбаев, Е. А. Ваганов.</i> Отклик древесно-кольцевых хронологий севера Евразии на мощные вулканические извержения	59
<i>М. Ю. Бардин.</i> Анализ долгопериодной изменчивости температуры воздуха в регионе Полярного Урала — севера Западной Сибири по данным дендрохронологических реконструкций	73
<i>М. В. Гальперин, М. А. Софиев.</i> Опыт моделирования водного режима озера Байкал и влияния на него изменений регионального климата	91
<i>А. Н. Золотокрылин.</i> Мониторинг климатической составляющей опустынивания	105
<i>О. А. Анисимов, С. А. Лавров, С. А. Ренева.</i> Оценка эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России при изменении климата ...	124
<i>Г. М. Черногаева, А. С. Зеленов.</i> Комплексная оценка загрязнения окружающей среды в субъектах и федеральных округах Российской Федерации ...	142
<i>Г. М. Черногаева, М. С. Зеленова, Н. О. Кулик.</i> Трансграничные проблемы рек России (на примере верхнего течения Днепра)	159
<i>Ю. Л. Цельникер, А. Г. Молчанов.</i> Соотношение нетто- и гросс-продукции и газообмен CO_2 в высокопродуктивных сосняках и березняках	174
<i>А. Н. Полевой, Н. И. Кульбида, И. В. Трофимова, Т. И. Адаменко.</i> Моделирование влияния изменений климата на продуктивность озимой пшеницы в Украине	191
<i>А. А. Романовская, М. Л. Гитарский, Р. Т. Карабань, И. М. Назаров.</i> Роль залежных земель России в поглощении диоксида углерода из атмосферы. ...	219
<i>О. Д. Сиротенко.</i> Прогноз урожая как задача физики	238
<i>А. Е. Кухта, С. Н. Титкина.</i> Климатогенные колебания линейного прироста ювенильных растений сосны обыкновенной в модельных древостоях в Пензенской области	251
<i>А. М. Баранова.</i> Массовые миграции населения как основной фактор распространения трансмиссивных паразитарных болезней	261
<i>В. В. Ясюкевич, Л. Е. Ривкин.</i> Использование результатов мониторинга видового разнообразия и численности шмелей для оценки антропогенного влияния на окружающую среду	276

<i>А. В. Пчелкин, А. А. Рудкова.</i> Фоновый мониторинг лишайников, обитающих на стволах сосны обыкновенной, в Волжско-Камском, Керженском и Печоро-Илычском заповедниках	287
<i>Е. С. Гельвер, С. М. Семенов.</i> Влияние изменения климата в конце XX века на территории России на теплообеспеченность сельскохозяйственных растений	303
<i>Ш. Хатомов, А. Жумамуратов, М. А. Жумамуратов.</i> Экологические наблюдения сезонного изменения микроэлементного состава воды реки Амударья в регионе Южного Приаралья	311

CONTENS

To the anniversary of professor Yu. A. Izrael, member of the Russian Academy of Sciences	10
<i>O. Solomina, G. Jacoby, R. D'Arrigo, A. Braeunning, N. Eremenko, Ya. Muraviev.</i> Summer temperature reconstructions of the last 400 years in Kamchatka and Kunashir based on tree-ring analysis.	37
<i>O. V. Sidorova, M. M. Naurzbaev, E. A. Vaganov.</i> Response of tree-ring chronologies from Subarctic Eurasia to the strong volcanic eruptions	59
<i>M. Yu. Bardin.</i> The analysis of long-term air temperature variability in Polar Urals region — northern Western Siberia using dendrochronological reconstructions	73
<i>M. V. Galperin, M. A. Sofiev.</i> An experience of modelling the water regime of lake Baikal and the influence of local climatic conditions on it	91
<i>A. N. Zolotokrylin.</i> Monitoring of climate-related component of desertification	105
<i>O. Anisimov, S. Lavrov, S. Reneva.</i> Assessing the methane emissions from the frozen wetlands in Russia under conditions of changing climate	124
<i>G. M. Chernogaeva, A. S. Zelenov.</i> Integrated assessment of environmental pollution in provinces and federal districts of the Russian Federation	142
<i>G. M. Chernogaeva, M. S. Zelenova, N. O. Kulik.</i> Transboundary problems of Russian rivers (a case of the upper Dnepr).	159
<i>Y. L. Tselniker, A. G. Molchanov.</i> A relationship between netto- and gross-production, and CO ₂ gas exchange in Scots pine and birch forest stands of high productivity	174
<i>A. N. Polevoy, N. I. Kulbida, I. V. Trofimova, T. I. Adamenko.</i> Modelling the influence of climate change on productivity of the winter wheat in Ukraine.	191
<i>A. A. Romanovskaya, M. L. Gytarsky, R. T. Karaban', I. M. Nazarov.</i> A Role of abandoned land of Russia in the removal of carbon dioxide from the atmosphere. . .	219
<i>O. D. Sirotenko.</i> Crop yield prediction as an issue of physics	238
<i>A. E. Koukhta, S. N. Titkina.</i> Climate-caused variations of the annual apical increment in juvenile Scotch pine trees in model stands located in the Penza province	251
<i>A. M. Baranova.</i> The mass people migration as a basic factor to the spread of parasitic transmission diseases.	261
<i>V. V. Yasjukevich, L. E. Rivkin.</i> The use of results of monitoring of species diversity and abundance of bumble bees for the assessment of anthropogenic influence on the environment.	276

<i>A. V. Pchelkin, A. A. Rudkova.</i> A background monitoring of epiphytic lichen communities in the Kergensky, Volgsko-Kamsky and Pechora-Ilych reserves	287
<i>E. S. Gelfer, S. M. Semenov.</i> The influence of climate change over Russia's territory at the end of 20th century on the availability of heat for the agricultural plants.	303
<i>Sh. Khatomov, A. Djumamuratov, M. A. Djumamuratov.</i> Ecological observations of seasonal changes in microelement composition of the Amhudyarya river water within the South Aral region	311

АКАДЕМИК ЮРИЙ АНТОНИЕВИЧ ИЗРАЭЛЬ



К ЮБИЛЕЮ АКАДЕМИКА Ю. А. ИЗРАЭЛЯ

*Г. П. Курбаткин, А. В. Цыбань, М. Я. Антоновский, В. А. Абакумов,
Г. В. Груза, В. И. Егоров, Р. Т. Карабань, Е. В. Квасникова,
И. М. Назаров, А. И. Нахутин, М. М. Новиков, В. Н. Петров,
Н. Н. Роева, В. П. Седякин, С. М. Семенов, Г. М. Черногаева,
А. Ф. Яковлев*

15 мая 2005 г. исполняется 75 лет со дня рождения академика Юрия Антониевича Израэля, выдающегося ученого, организатора науки и государственного деятеля, основателя и директора Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (ИГКЭ). Коллеги по институту сердечно поздравляют Юрия Антониевича с юбилеем, желают ему дальнейших творческих достижений в течение многих лет, успехов в борьбе за сохранение и развитие российской науки, неизменной энергии и крепкого здоровья.

Редколлегия сборника „Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем” — издания, которое было основано академиком Ю. А. Израэлем в 1978 г., — присоединяет свои самые теплые и искренние поздравления и пожелания по этому случаю. В ознаменование юбилея выдающегося ученого коллеги по ИГКЭ подготовили краткую научную биографию академика Израэля, а также библиографию его научных работ.

Ю. А. Израэль окончил в 1953 г. Среднеазиатский государственный университет (физический факультет). По окончании Университета сначала работал в Геофизическом институте, а затем — в Институте прикладной геофизики Академии наук СССР. Он прошел все ступени научной карьеры — от младшего научного сотрудника до директора Института, защитил кандидатскую диссертацию в области физико-математических наук в 1963 г. и докторскую диссертацию в 1969 г. В 1974 г. он был избран членом-корреспондентом, а в 1994 г. — действительным членом Российской Академии наук. В 1969—1973 гг. он возглавлял Институт прикладной геофизики АН СССР, в 1971 г. стал первым заместителем, а с 1974 г. — начальником Главного управления Гидрометеорологической службы при Совете министров СССР (ГУГМС). С 1978 по 1991 г. Ю. А. Израэль был председателем Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю окружающей среды (Госкомгидромет), в организации которого он принял самое активное участие. С 1990 г. по настоящее время Ю. А. Израэль — директор Института глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской Академии наук (ИГКЭ Росгидромета и РАН).

С 1978 по 1988 г. Ю. А. Израэль являлся депутатом Верховного Совета СССР.

Научная деятельность Ю. А. Израэля всегда была многогранна. Его собственные научные интересы и возглавляемые им проекты были направле-

ны на решение новых актуальных проблем — как фундаментальных, так и прикладных. Характерная особенность его научного стиля — работа с большими коллективами специалистов, имеющая междисциплинарный и межведомственный характер. Наибольший научный вклад Ю. А. Израэль внес в развитие таких наук, как ядерная геофизика, физика атмосферы, климатология, прикладная экология, океанология и география.

С самого начала своей научной карьеры Ю. А. Израэль работал над метеорологическими аспектами проблемы радиоактивного и химического загрязнения окружающей природной среды. В период работы в Геофизическом институте и Институте прикладной геофизики он лично собрал и проанализировал обширные массивы экспериментальных данных о рассеянии и поведении радиоактивных выбросов после испытаний ядерного оружия (1954—1974 гг.). Его исследования тех лет заложили основу нового направления в физике — теории радиоактивного загрязнения после ядерных взрывов и аварий — и позволили объединить потенциал ядерной физики, физики атмосферы и метеорологии. В результате были получены качественно новые знания, что привело к разработке новых методов оценки, анализа и прогноза процессов переноса радиоактивных и нерадиоактивных веществ в окружающей среде.

Следует особо отметить фундаментальную работу Ю. А. Израэля по исследованию формирования аэрозольных частиц при ядерных взрывах и авариях, которая позволила прогнозировать фракционирование и особенности распространения различных радионуклидов, в том числе с поверхностными и подземными водами, а также их биологическую доступность.

Ю. А. Израэль лично участвовал в исследованиях, проводимых на атомных полигонах (1954—1970 гг.) после различных аварий. Особое внимание он уделил в 1986—1996 гг. изучению последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

Материалы, связанные с исследованиями радиоактивности в природной среде начиная с 50-х годов прошлого века, опубликованы во многих статьях и монографиях и обобщены в монографии „Радиоактивные выпадения при ядерных взрывах и авариях” (в России издана в 1996 г., за рубежом — в 2000 г.).

В 1978 г. Ю. А. Израэль создал и возглавил Лабораторию мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета и АН СССР (ЛАМ). Именно он ввел в российскую науку термин „мониторинг”. По определению Ю. А. Израэля, мониторинг включает в себя наблюдения, анализ и прогноз состояния природной среды, с чем согласились ведущие специалисты — как отечественные (академики В. Е. Соколов, М. С. Гиляров и И. П. Герасимов), так и зарубежные (Т. Манн и др.). При осуществлении мониторинга использовались не только абиотические, но и биотические объекты. Был обоснован экологический мониторинг природных сред. В прикладном плане этот этап научной биографии академика Израэля связан прежде всего с разработкой научных основ мониторинга состояния окружающей

среды, развитием методологии оценки и прогноза антропогенных изменений природной среды в результате загрязнения, а также с развитием программ, методического обеспечения и алгоритмов анализа данных для сетей мониторинга состояния природной среды.

Ю. А. Израэль предложил и внедрил новую концепцию комплексного мониторинга окружающей среды. На основании этой концепции в СССР были созданы Сеть наблюдения и контроля загрязнения природных сред и Сеть комплексного фоновых мониторинга окружающей среды. Основные результаты, полученные в этот период, были представлены Ю. А. Израэлем в его известной монографии „Экология и контроль состояния природной среды”, вышедшей впервые на русском языке в 1979 г., на английском — в 1986 г. и на немецком — в 1990 г. Эта книга открыла новое направление в прикладной экологии.

Ю. А. Израэль всегда проявлял большой интерес к исследованию Мирового океана. Он не только лично участвовал в новых исследовательских разработках этого направления, но и внес основополагающий вклад в организацию многочисленных морских экспедиций, направленных на мониторинг океанических систем. По результатам долгопериодных экологических исследований в импактных и фоновых районах Мирового океана академиком Израэлем с сотрудниками ИГКЭ была разработана концептуальная модель фундаментального природного явления — ассимиляционной емкости морской экосистемы. При этом была обнаружена существенная роль биологических механизмов в ее формировании и поддержании. В течение многих лет Ю. А. Израэль уделял большое внимание экологическим проблемам морей российской Арктики в аспекте их антропогенных изменений. Результаты этих исследований обобщены Ю. А. Израэлем в соавторстве с А. В. Цыбань и коллегами в монографиях и опубликованы в монографии „Антропогенная экология океана” (1980), „Всесторонний анализ экосистемы Берингова моря” (1984), „Исследование экосистем Берингова и Чукотского морей” (1989—2000). Многие из них переведены на иностранные языки и изданы за рубежом. Важным практическим результатом этих исследований стало создание теории морского биологического мониторинга.

Необходимо отметить большие успехи Ю. А. Израэля в осуществлении крупных международных и отечественных программ. Более десяти лет он являлся сопредседателем советско-американской и советско-британской комиссий по охране окружающей среды, был председателем Государственных комиссий по Аральскому морю и озеру Байкал.

С конца 1970-х годов научные интересы Ю. А. Израэля все более обращаются к климатологическим аспектам физики атмосферы. В 1978 г. он участвует в разработке новой концепции Всемирной климатической программы (ВКП), которая в то время создавалась под эгидой Всемирной метеорологической организации — ВМО (в течение 12 лет Ю. А. Израэль был вице-президентом ВМО). Начиная с этого времени он активно участ-

вовал в развитии и усовершенствовании ВКП, особенно в части сбора данных и оценки компонента „воздействия” (impact). С 1988 г. Ю. А. Израэль принимает активное участие в работе Межправительственной группы экспертов по изменению климата — МГЭИК (Intergovernmental Panel on Climate Change — IPCC). В настоящее время он является вице-председателем МГЭИК. Основная задача этой группы экспертов — сбор и анализ опубликованных научных материалов по изменению климата, его последствиям для природных систем, систем жизнеобеспечения человека и социально-экономических систем, а также изучение возможностей их адаптации и смягчения антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Группа осуществляет также „неполитизированный” синтез этой информации (с 1988 г. выпущены три таких отчета).

В течение многих лет академик Ю. А. Израэль предпринимал неустанные усилия с целью побудить МГЭИК исследовать научные аспекты Статьи 2 Рамочной конвенции ООН об изменении климата, которая формулирует в качестве основной цели Конвенции предотвращение опасного антропогенного вмешательства в климатическую систему. Уже в работах 1979 и 1983 гг. академик Израэль предложил, а в 2004 г. развил концепцию максимально допустимого антропогенного воздействия на климатическую систему и биосферу, которая может стать основой современных прикладных разработок. В 2001 г. МГЭИК согласилась с его точкой зрения, что положило начало соответствующим работам. Ю. А. Израэль неоднократно инициировал климатические программы для России, направленные на создание системы научной поддержки и экспертизы политики России в области климата.

Особое внимание Ю. А. Израэль уделял научной обоснованности проблем, возникших при обсуждении положений Киотского протокола. В последнее время Ю. А. Израэль является председателем Междисциплинарного академического совета—семинара при президенте Российской Академии наук „Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. Проблема Киотского протокола”.

В 1990-х годах Ю. А. Израэль проводил исследования озонового слоя атмосферы Земли. Результаты этих исследований опубликованы им с группой соавторов в книге „Озоновый щит Земли и его изменения” (1992). Он инициировал работы в области оценки опасности „ядерной зимы”. Выдающийся вклад академика Ю. А. Израэля в развитие науки и организацию научных исследований получил широкое признание как в России, так и на международном уровне.

В 1992 г. ему была присуждена премия и золотая медаль Международной метеорологической организации, предшественницы ВМО. За работы в области исследования радиоактивности и загрязнения природной среды Ю. А. Израэль был награжден престижными международными научными наградами — премией им. Сасакавы (ЮНЕП) и золотой медалью международного центра „Этторе Маджорана” (Италия). Он имеет российские на-

учные награды: три премии имени Е. К. Федорова и золотую медаль им. В. Н. Сукачева Академии наук СССР за выдающуюся работу в области экологии, присужденную ему за книгу „Экология и контроль природной среды” (1983). Ю. А. Израэль — лауреат Государственной премии (1981 г.) в области охраны окружающей среды.

Академик Ю. А. Израэль — член Международной академии астронавтики, почетный член Венгерского метеорологического общества, действительный член Российской Академии наук и президент Российской экологической академии. В 1999 г. он был избран членом Международного союза радиозэкологов. Ю. А. Израэль — главный редактор журнала „Метеорология и гидрология”.

Академик Ю. А. Израэль всегда уделял особое внимание организации национальных и международных научных форумов, которые давали бы возможность ученым и политикам совместно обсуждать приоритетные проблемы современной науки и их влияние на процесс принятия решений. Только в последнее время он был сопредседателем оргкомитета международной конференции „Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий”, которая проходила в Москве в апреле 2000 г., и сопредседателем оргкомитета Всероссийской конференции „Научные аспекты экологических проблем России” (2001 г.), выступил с докладами более чем на 30 международных конференциях и симпозиумах.

По предложению Ю. А. Израэля были проведены первая (1979 г.) и вторая (1990 г.) Всемирные климатические конференции. В 2002 г. Ю. А. Израэль сформулировал идею о проведении Всемирной конференции по изменению климата. Это предложение было официально выдвинуто Президентом России В. В. Путиным на саммите „Большой восьмерки” в Генуе. Конференция с большим успехом прошла в Москве осенью 2003 г. На конференцию собралось более 2200 специалистов, было представлено более 400 докладов отечественных и зарубежных ученых.

Научные идеи академика Ю. А. Израэля и его выдающиеся результаты нашли свое отражение в многочисленных публикациях, перечень которых составляет несколько сотен названий. Ниже приведены основные работы Ю. А. Израэля, характеризующие его вклад в мировую науку.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ АКАДЕМИКА Ю. А. ИЗРАЭЛЯ

МОНОГРАФИИ (В ХРОНОЛОГИЧЕСКОМ ПОРЯДКЕ)

Израэль Ю. А., Стукин Е. Д. Гамма-излучение радиоактивных выпадений. — М.: Атомиздат, 1967. — 224 с.

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Прессман А. Я., Стукин Е. Д. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы его прогнозирования. — Л.: Гидрометеоздат, 1970. — 67 с.

Израэль Ю. А. Выпадение трития и оценка возможных доз внутреннего облучения от трития в зоне дальнего следа при подземном ядерном взрыве с выбросом. — М., 1971. — 95 с.

Израэль Ю. А. Изотопный состав радиоактивных выпадений. — Л.: Гидрометеоздат, 1973. — 108 с.

Израэль Ю. А. Мирные ядерные взрывы и окружающая среда. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 135 с.

Израэль Ю. А., Гасилина Н. К., Ровинский Ф. Я., Филиппова Л. М. Осуществление в СССР системы мониторинга загрязнения природной среды. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 117 с.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Проблемы мониторинга экологических последствий загрязнения океана. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 59 с.

Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 375 с.

Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. 2-е издание. — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 560 с. (Izrael Yu. Ecology and Control of the Natural Environment. — Dordrecht — Boston — London: Kluwer Acad. Publ., 1986. Izrael Ju. Ökology und Umweltüberwachung. — Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1990. — 336 S.)

Израэль Ю. А. Проблемы охраны природной среды и пути их решения. — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 45 с.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. Научное обоснование программы комплексного экологического мониторинга океана (Программы МОНОК). — М.: Гидрометеоздат, 1986. — 50 с.

Абагян А. А., Израэль Ю. А. и др. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия: Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (25 — 29 августа 1986 г.). — Вена, ГКАЭ, 1986. — 71 с.

Будыко М. И., Голицын Г. С., Израэль Ю. А. Глобальные климатические катастрофы. — М.: Гидрометеоздат, 1986. — 278 с.

Budyko M., Golitsyn G., Izrael Yu. Global climate catastrophes. Berlin — Heidelberg — New York — London — Paris — Tokio: Springer — Verlag, 1988. — 99 p.

Антропогенные изменения климата / И. И. Борзенкова, М. И. Будыко, Э. К. Бютнер, А. А. Величко, К. Я. Винников, Г. С. Голицын, Ю. А. Израэль, В. Легасов и др. / Под ред. Будыко М. И., Израэля Ю. А. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 406 с. (книга издана также в США).

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Авдюшин С. И. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции. — М.: Гидрометеиздат, 1987. — 53 с.

Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ / Израэль Ю. А., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 303 с.

Израэль Ю. А., Ровинский Ф. Я. Берегите биосферу. — М.: Наука, 1988. — 120 с.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 527 с.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Прессман А. Я., Филиппова Л. М., Рябошапко А. Г. Кислотные дожди. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 269 с.

Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю. А. Израэль, С. М. Вакуловский, В. А. Ветров, В. Н. Петров, Ф. Я. Ровинский, Е. Д. Стукин / Под ред. Ю. А. Израэля. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 296 с.

Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 287 с.

Results of the Third Joint US — USSR Bering and Chukchi Seas Expedition (BERPAC) Summer, 1988 / Yu. Izrael, A. Tsyban, J. Turner, O'Conner H.J., eds. — Washington, DC, US Fish and Wildlife Service, 1992. — 415 p.

Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. — СПб.: Прогресс-погода, 1996. — 355 с.

Изменение климата 2001. Обобщенный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Ю. А. Израэль — один из ред.-реп. — 220 с. (Climate change 2001. Synthesis Report of the intergovernmental Panel on Climate Change / Yu. Izrael — on of the Rev. Editors).

Izrael Yu. Radiactive Fallout after Nuclear Explosions and Accidents Amsterdam — Boston — ... — Sydney — Tokyo: Elsevier, 2002. — 281 p.

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЕ ИЗДАНИЯ

Большая советская энциклопедия (БСЭ). В 30 т. 3-е издание / А. М. Прохоров, гл. ред.; Ю. А. Израэль, член ред. коллегии. — М.: Советская энциклопедия, 1970—1978.

Большой энциклопедический словарь. Т. 1—2 / А. М. Прохоров, председатель научно-редакционного совета издательства, Ю. А. Израэль, член совета издательства. — М.: Советская энциклопедия, 1991.

Encyclopedia of Global Environmental Change. Vol. 1—5 / Ted Munn, editor-in-chief; Yu. A. Izrael, member Int. Advisory Board. — 2002.

Global Studies Encyclopedia / Yu. Izrael, member of Ed. Board. — Moscow: Dialog, 2003.

АТЛАСЫ

Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии / Ю. А. Израэль и др., ред. — Люксембург, Бюро по официальным изданиям Европейских сообществ, 1998. — 108 с.

Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины / Ю. А. Израэль, научный руководитель, ред. — М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1998. — 143 с.

Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident / Yu. Izrael — Scientific Direction, co-ordinator, co-author. — Luxemburg, Publ. by Office for Off. Publ. of E.C., 1998. — 108 p.

ИЗДАНИЯ ПОД РЕДАКЦИЕЙ Ю. А. ИЗРАЭЛЯ

Актуальные проблемы охраны окружающей среды в Советском Союзе и Федеративной Республике Германии: Труды Научного симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Мюнхен, 1981. — 873 с.

Актуальные проблемы охраны природной среды в Советском Союзе и Федеративной Республике Германии: Труды II симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 400 с.

Библиографический указатель литературы по проблеме „Искусственные радиоактивные изотопы в окружающей среде” (1965 — 1970 гг.) / Ю. А. Израэль, ред. — М.: Гидрометеиздат, 1974. — 238 с.

Библиографический указатель литературы по проблеме загрязнения и охраны окружающей среды (1973 — 1974 гг.). Вып. 2 / Ю. А. Израэль, ред. — М.: Гидрометеиздат, 1979. — 423 с.

Биосферные заповедники: Труды II советско-американского симпозиума / Ю. А. Израэль, отв. ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 276 с.

Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды советско-американского симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 326 с.

Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды II советско-американского симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 307 с.

Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды III советско-американского симпозиума / Ю. А. Израэль, гл. ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 275 с.

Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды IV советско-американского симпозиума / Ю. А. Израэль, гл. ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 315 с.

Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды V советско-американского симпозиума / Ю. А. Израэль, гл. ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 248 с.

Всесторонний анализ экосистемы Берингова моря / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 264 с.

Глобальные изменения климата и их последствия для России / Г. С. Голицын, Ю. А. Израэль, ред. — М., 2002. — 466 с.

Динамика экосистем Берингова и Чукотского морей / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань и др., ред. — М.: Наука, 2000. — 357 с.

Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды: Сборник статей / Ю. А. Израэль, Ю. В. Власова, Ю. С. Седунов и др., ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 238 с.

Исследование экосистемы Берингова моря / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 156 с.

Исследование экосистемы Берингова моря. Вып. 2: Итоги II советско-американской экспедиции в Беринговом море, 37-й рейс НИС „Академик Королев”, июнь — сентябрь 1984 г. / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 344 с.

Исследование экосистем Берингова и Чукотского морей. Вып. 3 / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань, ред. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 655 с.

Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды: Труды Международного симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 375 с.

Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды: Труды II Международного симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 392 с.

Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана: Труды I Международного симпозиума. Т. 1 — 3 / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1985.

Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Труды III Международного симпозиума. Т. 1 — 3 / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1986.

Космический мониторинг биосферы. Вып. 1 / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 144 с.

Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья: Материалы Всесоюзных Байкальских школ-семинаров / Ю. А. Израэль, Ю. А. Анохин, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 240 с.

Мониторинг окружающей природной среды: Труды I конференции молодых ученых ЛАМА / Ю. А. Израэль, ред. — М.: Гидрометеиздат, 1986. — 114 с.

Мониторинг окружающей природной среды: Труды II конференции молодых ученых ЛАМА / Ю. А. Израэль, ред. — М.: Гидрометеиздат, 1989. — 120 с.

Мониторинг природной среды в бассейне Аральского моря (проблемы разработки): Материалы научно-координационных совещаний / Ю. А. Израэль, Ю. А. Анохин, ред. — СПб.: Гидрометеиздат, 1991. — 216 с.

Мониторинг состояния озера Байкал / Ю. А. Израэль, Ю. А. Анохин, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 261 с.

Мониторинг состояния окружающей природной среды: Труды I советско-английского симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 261 с.

Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 1 — 7 / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1982 — 1991.

Научные аспекты экологических проблем России: Основные итоги Всероссийской конференции / Ю. А. Израэль, ред. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 103 с.

Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям: Труды II советско-английского семинара / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 279 с.

Обзор загрязнения окружающей природной среды за 1995 г. / Под ред. Ю. А. Израэля, А. В. Цыбань, Ф. Я. Ровинского и др. — М.: Росгидромет, 1995. — 144 с.

Обзор загрязнения окружающей природной среды за 1996 г. / Под ред. Ю. А. Израэля, А. В. Цыбань, Ф. Я. Ровинского и др. — М.: Росгидромет, 1996. — 144 с.

Обзор загрязнения окружающей природной среды в Российской Федерации за 1996 г. / Ю. А. Израэль, Ю. С. Цатуров и др., ред. — М.: Росгидромет, 1997. — 297 с.

Обзор загрязнения окружающей природной среды в Российской Федерации за 1997 г. / Ю. А. Израэль, Ю. С. Цатуров и др., ред. — М.: Росгидромет, 1998. — 218 с.

Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2002 г. / Ю. А. Израэль и др., ред. — М.: Гидрометеиздат, 2003.

Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2003 г. / Ю. А. Израэль и др., ред. — М.: Гидрометеиздат, 2004.

Обзор состояния окружающей природной среды в СССР (по материалам наблюдений 1988 — 1989 гг.) / Ю. А. Израэль, Ф. Я. Ровинский, ред. — М.: Гидрометеиздат, 1990. — 114 с.

Обзор фоновое состояние окружающей природной среды в СССР за 1981 г. / Ю. А. Израэль, Ф. Я. Ровинский, Ю. А. Анохин и др. — М.: Гидрометеиздат, 1982.

Обзор фоновое состояние окружающей природной среды в СССР за 1982 г. / Ю. А. Израэль, Ф. Я. Ровинский, Ю. А. Анохин и др. — М.: Гидрометеиздат, 1983.

Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 1996 г. / Ю. А. Израэль, Ф. Я. Ровинский, ред. — М.: Росгидромет, 1997. — 36 с.

Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2001 г. / Ю. А. Израэль, ред. — СПб.: Гидрометеиздат, 2002. — 62 с.

Обзор экологического состояния морей Российской Федерации и отдельных районов Мирового океана за 1992 г. / Под ред. Ю. А. Израэля, А. В. Цыбань и др. — М.: Гидрометеиздат, 1993. — 173 с.

Оценки экологических и социально-экономических последствий изменения климата: Доклад Рабочей группы II МГЭИК / Ю. А. Израэль, М. Хашимото, Тегарт У. Дж. Мак Г., рук. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 250 с.

Оценки экологических и социально-экономических последствий изменения климата: Дополнение к докладу 1990 г. Рабочей группы II МГЭИК / Ю. А. Израэль, О. Канзиани, М. Хашимото и др., рук. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 127 с.

Предстоящие изменения климата: Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях / Под ред. М. И. Будыко, Ю. А. Израэля и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 272 с.

Проблемы мониторинга и охраны окружающей среды: Труды I советско-канадского симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 400 с.

Проблемы регионального мониторинга озера Байкал / Ю. А. Израэль, гл. ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 206 с.

Проблемы современной гидрометеорологии: Сборник статей / Ю. А. Израэль, пред. редколлегии. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 343 с.

Проблемы социально-экологического мониторинга / Ю. А. Израэль, Ю. А. Анохин, ред. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 183 с.

Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 1—19 / Под ред. Ю. А. Израэля. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 2003.

Радиационные аспекты Чернобыльской аварии: Труды I Всесоюзной конференции. Т. 1—3 / Ю. А. Израэль, ред. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993.

Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: Труды Международной конференции. Т. 1—2 / Под ред. Ю. А. Израэля. — СПб.: Гидрометеиздат, 2000.

Радиоактивные выпадения от ядерных взрывов: Сборник статей / Пер. с англ. Под ред. Ю. А. Израэля. — М.: Мир, 1968. — 342 с.

Совершенствование регионального мониторинга состояния озера Байкал / Ю. А. Израэль, Л. М. Филиппова, Ю. А. Анохин и др., ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 295 с.

Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений / Ю. А. Израэль, ред. — М.: Наука, 2001. — 242 с.

Труды Всемирной конференции по изменению климата / Ю. А. Израэль, пред. редколлегии. — М., 2004.

Указатель литературы по проблеме „Загрязнение и окружающая среда” (1971 — 1972 гг.). Вып. 1 / Под ред. Ю. А. Израэля, И. М. Назарова, Н. Ю. Вайль. — М.: Гидрометеиздат, 1977. — 212 с.

Физические аспекты теории климата: Труды III Всесоюзного симпозиума / Ю. А. Израэль, ред. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 211 с.

Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы / Пер. с англ. Под ред. Ю. А. Израэля — М.: Мир, 1965. — 424 с.

Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды: Труды I Всесоюзного совещания / Редколлегия: Ю. А. Израэль, А. А. Кист, Г. Н. Воронская и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 260 с.

Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды: Труды II Всесоюзного совещания / Редколлегия: Ю. А. Израэль и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 253 с.

Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды: Труды III Всесоюзного совещания / Редколлегия: Ю. А. Израэль, Г. Н. Воронская, Глухов и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 172 с.

Integrated Global Ocean Monitoring: Proceedings of the I Intern. Symp. Vol. 1—3 / Yu. A. Izrael, A. V. Tsyban, A. S. Sarkisyan, eds. — L.: Gydrometeoizdat, 1986.

Izrael Yu. A., Budyko M. I., MacCracken M. C., Heckt A. D., eds. Prospects for Future Climate: A Special US/USSR Report on Climate and Climate Change. — Chelsea, Michigan: Lewis Publishers Inc., 1991.

World Conference of Climate Changes / Yu. Izrael, Chairman of Edit. Board. — Moscow, 2004.

СТАТЬИ В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ

Абагян А. А., Израэль Ю. А., Ильин Л. А., Легасов В. А. и др. Информация об аварии на ЧАЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 5. С. 301 — 320.

Болтнева Л. И., Израэль Ю. А., Назаров И. М. и др. Глобальное загрязнение Cs-137 и Sr-90 дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия. 1977. Т. 42. С. 355.

Будыко М. И., Израэль Ю. А., Яншин А. Л. Глобальное потепление и его последствия // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 5—10.

Израэль Ю. А. Влияние микрорельефа земной поверхности на распространение гамма-излучения в приземном слое атмосферы // Известия АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 5. С. 818—824.

Израэль Ю. А. К расчету мощности дозы внутри сферического источника с Гауссовым распределением γ -излучателя // Атомная энергия. 1963. Т. 14. Вып. 3. С. 317—318.

Израэль Ю. А. Влияние неровностей почвы на поле над местностью, загрязненной радиоактивными выпадениями // Атомная энергия. 1964. Т. 17. Вып. 2. С. 137—140.

Израэль Ю. А. Поле гамма-излучения поверхностного радиоактивного загрязнения местности в приземном слое атмосферы // Известия АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 7. С. 1103—1115.

Израэль Ю. А. Об определении коэффициентов фракционирования и биологической доступности продуктов ядерных взрывов в радиоактивных выпадениях // Доклады АН СССР. 1965. Т. 161. № 2. С. 343—346.

Израэль Ю. А. Спектр γ -излучения искусственной модели радиоактивных выпадений // Атомная энергия. 1965. Т. 19. Вып. 2. С. 199—200.

Израэль Ю. А. Условия образования частиц радиоактивных выпадений и фракционирование изотопов при подземном ядерном взрыве с выбросом грунта // Доклады АН СССР. 1966. Т. 169. № 3. С. 573—576.

Израэль Ю. А. Изотопы в гидрологии // Атомная энергия. 1970. Т. 29. № 3. С. 227—232.

Израэль Ю. А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. 1974. № 7. С. 3—8.

Израэль Ю. А. Об оценке состояния биосферы и обосновании мониторинга // Доклады АН СССР. 1976. Т. 226. № 4. С. 955 — 957.

Израэль Ю. А. Основные задачи Гидрометеорологической службы СССР и перспективы ее развития // Метеорология и гидрология. 1976. № 7. С. 3—15.

Израэль Ю. А. Современный этап советско-американского сотрудничества в области охраны природной среды // Вестник АН СССР. 1976. № 10. С. 114—118.

Израэль Ю. А. О результатах и перспективе научных исследований в Гидрометслужбе СССР // Метеорология и гидрология. 1977. № 11. С. 3—18.

Израэль Ю. А. Философия мониторинга // Метеорология и гидрология. 1990. № 6. С. 5—10.

Израэль Ю. А. Эхо Чернобыля // Наука и жизнь. 1990. № 9. С. 28—29.

Израэль Ю. А. II Всемирная климатическая конференция // Метеорология и гидрология. 1991. № 4. С. 5—28.

Израэль Ю. А. Исследования влияния изменения климата // Метеорология и гидрология. 1991. № 4. С. 29—35.

Израэль Ю. А. Об оценке радиационной обстановки и радиоактивного загрязнения природной среды при аварии на ЧАЭС // Метеорология и гидрология. 1996. № 4. С. 5—7.

Израэль Ю. А. Радиоактивное загрязнение земной поверхности: обсуждение в Президиуме РАН // Вестник РАН. 1998. Т. 68. № 10. С. 898—915.

Израэль Ю. А. Науки о Земле на рубеже веков: науки об атмосфере и гидросфере // Использование и охрана природных ресурсов России. Бюллетень. 1999. № 5—6. С. 105—113.

Израэль Ю. А. Я сделал все, что было в моих силах и компетенции. Участие Госкомгидромета СССР в ликвидации Чернобыльской аварии и ее последствий // Бюллетень по атомной энергии. 2001. № 3—4. С. 23—31.

Израэль Ю. А. Комплексный и радиационный мониторинг для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития // Известия Академии пром. экол. 2003. № 3. С. 43—45.

Израэль Ю. А. О концепции опасного антропогенного воздействия на климатическую систему и возможностях биосферы // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 30—37.

Израэль Ю. А. Всемирная конференция по изменению климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 13—17.

Израэль Ю. А., Артемов Е. М., Назаров И. М. и др. Радиоактивное загрязнение местности в результате аварии на радиохимическом заводе в Томске-7 // Метеорология и гидрология. 1993. № 6. С. 5—8.

Израэль Ю. А., Василенко В. Н., Дликман И. Ф. и др. К проблеме загрязнения природной среды бензопиреном // Метеорология и гидрология. 1992. № 9. С. 36—43.

Израэль Ю. А., Волков А. С., Ковалев А. Ф. Радиоактивное загрязнение территории бывшего Советского Союза от испытательных ядерных взрывов на Новой Земле осенью 1961 г. // Метеорология и гидрология. 1995. № 5. С. 5—12.

Израэль Ю. А., Гасилина Н. К., Ровинский Ф. Я. Система наблюдения и контроля загрязнения природной среды в СССР // Метеорология и гидрология. 1978. № 10. С. 5—12.

Израэль Ю. А., Голицын Г. С., Хубларян М. Г. и др. Развитие наук об атмосфере и гидросфере // Вестник РАН. 1999. Т. 69. № 5. С. 441—448.

Израэль Ю. А., Груза Г. В., Катцов В. М. и др. Изменения глобального климата: роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 5—21.

Израэль Ю. А., Груза Г. В., Катцов В. М. и др. Изменения глобального климата: роль антропогенных воздействий // Использование и охрана природных ресурсов в России. Бюллетень. 2001. № 8. С. 50—58.

Израэль Ю. А., Де Корт М., Джонес А. Р., Квасникова Е. В. и др. Атлас радиоактивного загрязнения Европы цезием-137 после Чернобыльской аварии // Метеорология и гидрология. 1996. № 4. С. 8—17.

Израэль Ю. А., Зенин Ю. А. Об охране озера Байкал // Метеорология и гидрология. 1973. № 1. С. 15—19.

Израэль Ю. А., Имшенник Е. В., Квасникова Е. В. и др. Долгосрочный прогноз изменения радиоактивного загрязнения территории России цезием-137 после аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1998. № 4. С. 5—17.

Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Семенов С. М., Цыбань А. В. и др. Изменение климата, разрушение озонового слоя и экологические последствия // Метеорология и гидрология. 1994. № 2. С. 5—14.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В. Об итогах Международной конференции „Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях” // Бюллетень ЦОИ. 2001. № 6. С. 4—51.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М. и др. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины — итог радиационного мониторинга после аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 5—16.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М. и др. Радиоактивное загрязнение территории стран СНГ и Европы // Использование и охрана природных ресурсов России. Бюллетень. 1999. № 3—4. С. 166.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М., Стукин Е. Д. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории России на рубеже веков // Метеорология и гидрология. 2000. № 4. С. 20—31.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Глобальное и региональное радиоактивное загрязнение цезием-137 Европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 5—9.

Израэль Ю. А., Коган Р. М., Фридман Ш. Д. Деформация гамма-поля в приземном слое атмосферы, обусловленная лесным покровом // Известия АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 8. С. 1126—1135.

Израэль Ю. А., Колесникова В. Н., Романов В. В. и др. О содержании трития в ледниках // Доклады АН СССР. 1964. Т. 156. № 1. С. 72—73.

Израэль Ю. А., Кунина И. М., Семенов С. М. Сравнительные оценки влияния озона, двуокиси серы и двуокиси азота на продуктивность высших растений // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308. № 1. С. 247—250.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Анохин Ю. А. и др. Экологический подход к оценке состояния и регулирования качества окружающей природной среды // Доклады АН СССР. 1978. Т. 241. № 3. С. 723—726.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Гитарский М. Н. и др. Киотский протокол — проблемы его ратификации // Метеорология и гидрология. 2002. № 11. С. 5—12.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Нахутин А. И. Об оценке антропогенной эмиссии и стока парниковых газов // Метеорология и гидрология. 2003. № 5. С. 5—12.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Нахутин А. И. и др. Эмиссия парниковых газов в России // Бюллетень по атомной энергии. 2002. № 3. С. 33—37.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Нахутин А. И., Яковлев А. Ф. и др. Вклад России в изменение концентрации парниковых газов в атмосфере // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 17—27.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. и др. Радиационная обстановка на территории Европейской части СНГ и Урала в 1991 г. // Метеорология и гидрология. 1992. № 11. С. 5—14.

Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А. Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 18—26.

Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 1. С. 22—34.

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Авдюшин С. И. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1987. № 2. С. 5—18.

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Северов Д. А. О влиянии атмосферных ядерных взрывов на содержание озона в стратосфере // Метеорология и гидрология. 1983. № 9. С. 5—13.

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Северов Д. А. Моделирование радиоактивных выпадений в ближней зоне от аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1987. № 7. С. 5—12.

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Северов Д. А. Региональная модель переноса и выпадения радионуклидов от аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1989. № 6. С. 5—14.

Израэль Ю. А., Петров В. Н., Северов Д. А. и др. Моделирование воздействия атмосферных ядерных взрывов на содержание озона в стратосфере // Метеорология и гидрология. 1990. № 12. С. 5—15.

Израэль Ю. А., Семенов С. М. Пример вычисления критических границ содержания парниковых газов в атмосфере с помощью минимальной имитационной модели парникового эффекта // Доклады РАН. 2003. Т. 390. № 4. С. 533—536.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Кунина И. М., Замараева Т. В. Модификация прямого эффекта диоксида углерода на высшие растения вследствие воздействия тропосферного озона // Доклады РАН. 1994. Т. 338. № 5. С. 711—713.

Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. 2003. № 6. С. 5—17.

Израэль Ю. А., Стукин Е. Д., Цатуров Ю. С. О возможности идентификации радиоактивных следов ядерных взрывов и реконструкции и доз облучения населения с использованием анализа долгоживущих радионуклидов // Метеорология и гидрология. 1994. № 12. С. 5—14.

Израэль Ю. А., Тер-Сааков А. А., Малахов С. Г., Курганская В. М., Ровинский Ф. Я., Иохельсон С. Б., Стукин Е. Д. и др. Изотопы вольфрама в свежих радиоактивных выпадениях в декабре 1968 г. // Атомная энергия. 1971. Т. 30. № 4. С. 377—380.

Израэль Ю. А., Тер-Сааков А. А., Щетинин Н. Н. Моделирование частиц радиоактивных выпадений // Атомная энергия. 1968. Т. 24. Вып. 6. С. 584—586.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Ровинский Ф. Я. и др. О программе комплексного фоновго мониторинга состояния окружающей природной среды // Метеорология и гидрология. 1978. № 9. С. 5—11.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. и др. О некоторых принципах экологического мониторинга в условиях фоновго загрязнения окружающей природной среды // Доклады АН СССР. 1978. Т. 241. № 1. С. 253—255.

Израэль Ю. А., Цатуров Ю. С., Назаров И. М. и др. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 5—18.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Об ассимиляционной емкости Мирового океана // Доклады АН СССР. 1983. Т. 272. № 3. С. 702—705.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экология и проблемы комплексного глобального мониторинга Мирового океана // Метеорология и гидрология. 1984. № 8. С. 18—33.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана // Вестник АН СССР. 1988. № 9. С. 29—39.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Вакуловский С. М. Радиоактивное загрязнение морей и океанов // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. С. 15—23.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Вентцель М. В., Шигаев В. В. Научное обоснование экологического нормирования антропогенного воздействия на морскую экосистему (на примере Балтийского моря) // Океанология. 1988. Т. 28. Вып. 2.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Кудрявцев В. М. и др. Проникновение биологически активной УФ-радиации и ее воздействие на важнейшие биологические процессы в Беринговом и Чукотском морях // Метеорология и гидрология. 1995. № 10. С. 13—28.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. Микробная трансформация полихлорированных бифенилов в полярных морских регионах // Доклады АН СССР. 1990. Т. 310. № 2. С. 502—505.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. Об экологической ситуации в морях России // Метеорология и гидрология. 1993. № 8. С. 15—21.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. и др. Современное состояние прибрежных экосистем морей Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 1995. № 9. С. 6—21.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Симонов А. И. Исследования загрязнения Тихого океана // Земля и Вселенная. 1980. № 3.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Щука С. А., Мошаров С. А. Потоки полихлорированных бифенилов в экосистемах Балтийского моря // Метеорология и гидрология. 1999. № 10. С. 63—76.

Назаров И. М., Израэль Ю. А., Гитарский М. Л., Нахутин А. И., Яковлев А. Ф. Проблема антропогенного воздействия на климат и Киотский протокол // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 137—148.

Anokhin Yu. A., Izrael Yu. A. Monitoring and assessment of the environment in the Lake Baikal region // Aquatic Ecosystem Health and Management. 2000. Vol. 3. P. 199—201.

Anokhin Yu. A., Ostromogilsky A. Kh., Izrael Yu. A. Lake Baikal integrated background monitoring // Environmental Monitoring and Assessment. 1982. Vol. 2. N 4. P. 403—417.

Izrael Yu. A., Filippova L. M., Insarov G. E., Semevsky F. N., Semenov S. M. Disturbance of the terrestrial ecosystems stability due to global-scale anthropogenic impacts // Environment Monitoring and Assessment. 1988. Vol. 11. P. 239—246.

Izrael Yu. A., Gytarsky M. L., Karaban R. T. et al. Consequences of climate change for forestry and carbon dioxide sink in Russian forests // Izvestiya RAS. Atmospheric and Ocean Physics. 2002. Vol. 38. Suppl. P. S84—S98.

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Problems of monitoring the ecological consequences of ocean pollution // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1981. Vol. 36. N 6.

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Ecological principles of World Ocean monitoring // Environment Monitoring and Assessment. 1982. Vol. 2. N 4.

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Ecology and the problems of World Ocean Integrated Global Monitoring // Environmental Monitoring and Assessment. 1986. Vol. 1.

Izrael Yu. A., Tsyban A. V., Rovinskyi F. Yu., Seki H. The Second International Symposium on Integrated Global Ocean Monitoring of Environmental Pollution // *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. 1983. Vol. 39.

Izrael Yu., Tsyban A. V., Shchuka S. A., Mosharov S. A. World ocean ecosystem changes caused by anthropogenic impacts, including climate changes // *Izvestiya RAS. Atmospheric and Ocean Physics*. 2002. Vol. 38. Suppl. 1.

*СТАТЬИ В НАУЧНЫХ СБОРНИКАХ, ТРУДАХ НИИ, КОНФЕРЕНЦИЙ,
СИМПОЗИУМОВ, СЕМИНАРОВ*

Анохин Ю. А., Израэль Ю. А. Системный анализ и имитационное математическое моделирование как методологическая основа определения допустимых нагрузок антропогенных загрязнений окружающей среды — региональный подход // *Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды советско-американского симпозиума*. Л.: Гидрометеиздат, 1975. С. 68—82.

Гречушкина М. П., Израэль Ю. А. Фракционирование радиоактивных продуктов ядерного взрыва // *Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии*. М., 1965. С. 164—180.

Гречушкина М. П., Израэль Ю. А., Петров В. Н. Возможные технические подходы для выработки норм безопасного проведения ядерных взрывов в мирных целях // *Peaceful Nuclear Explosions III: Proceedings of a panel on the practical applications on the peaceful uses of nuclear explosions organized by the International Atomic Energy Agency*. Vienna: IAEA, 1972. P. 377—387.

Израэль Ю. А. Фракционирование изотопов в радиоактивных выпадениях на больших расстояниях от места взрыва // *Исследование процессов самоочищения атмосферы от радиоактивных изотопов: Сборник докладов, прочитанных на совещании в Паланге 7—9 июня 1966 г.* Вильнюс: Минтис, 1968. С. 57—63.

Израэль Ю. А. Радиоактивность при камуфлетных подземных ядерных взрывах // *Peaceful Nuclear Explosions. Phenomenology and Status Report 1970: Proceedings of a Panel of the Peaceful Uses of Nuclear Explosions Organized by the International Atomic Energy Agency*. Vienna: IAEA, 1970. P. 231—240.

Израэль Ю. А. Расчет эффектов фракционирования при атмосферных ядерных взрывах // *Труды ИЭМ*, 1971. Вып. 21. Ч. 1. С. 97—102.

Израэль Ю. А. Феноменология загрязнения атмосферы и местности продуктами подземных ядерных взрывов // *Peaceful Nuclear Explosions II: Proceedings of a panel on the practical applications on the peaceful uses of nuclear explosions organized by the International Atomic Energy Agency*. — Vienna: IAEA, 1971. P. 301—320.

Израэль Ю. А. Допустимая антропогенная нагрузка на окружающую среду // *Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды II советско-американского симпозиума*. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 12—19.

Израэль Ю. А. Гидрометеорология и контроль состояния природной среды // *Проблемы современной гидрометеорологии*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 230—254.

Израэль Ю. А. Концепция мониторинга состояния биосферы // *Мониторинг состояния окружающей природной среды: Труды I советско-английского симпозиума*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 10—25.

Израэль Ю. А. Роль всестороннего анализа окружающей природной среды в организации оптимального взаимодействия человека с природой // *Всесторонний ана-*

лиз окружающей природной среды: Труды III советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 14—22.

Израэль Ю. А. Фоновый мониторинг и его роль в глобальной оценке и прогнозе состояния биосферы // II Международный симпозиум по комплексному глобальному мониторингу загрязнения природной среды: Тезисы докладов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 3—5.

Израэль Ю. А. Фоновый мониторинг и его роль в оценке и прогнозе глобального состояния биосферы // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды: Труды II Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 9—25.

Израэль Ю. А. и др. Основные итоги и перспективы развития гидрологии в свете решений XXVII съезда КПСС // Генеральные доклады V Всесоюзного гидрологического съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1. С. 3—59.

Израэль Ю. А. Роль мониторинга в управлении экономикой: экологическое нормирование // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Труды III Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 31—38.

Израэль Ю. А. Роль гидрометеорологии и наук об окружающей среде в исследовании и регулировании состояния биосферы. Об экологической программе страны // Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 167—182.

Израэль Ю. А. Проблемы всестороннего анализа окружающей среды и принципы комплексного мониторинга // Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды V советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 16—25.

Израэль Ю. А. Изменения климата — глобальная экологическая проблема номер один // Человек и стихия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 3—5.

Израэль Ю. А. Последствия изменений глобального и регионального климата // Глобальные проблемы как источник чрезвычайных ситуаций: Международная конференция. М., 1998. С. 135—138.

Израэль Ю. А. Изменения климата и их последствия: реакция мирового сообщества, 2000 // Проблемы гидрометеорологии и окружающей среды на пороге XXI века: Труды международной теоретической конференции. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. С. 5—13.

Израэль Ю. А. О предельных возможностях биосферы и климатической системы при критических антропогенных воздействиях // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2001. С. 5—9.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А. Системный подход к обоснованию допустимой антропогенной нагрузки на атмосферу // Математическое моделирование динамики атмосферных процессов и методы оценки влияния деятельности человека на атмосферу: Тезисы докладов. Ташкент: Еш гвардия, 1976.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А. Концепция комплексного мониторинга состояния природной среды в бассейне озера Байкал // Мониторинг состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 6—10.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А. Осуществление и совершенствование региональной системы мониторинга состояния озера Байкал // Доклады VI Всесоюзной Байкальской школы-семинара „Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья”. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 10—14.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А. Проблемы оценки экологических, социальных и экономических последствий деградации окружающей природной среды в Приаралье // Мониторинг природной среды в бассейне Аральского моря. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 4—6.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Андрианова Г. А. Глобальные изменения климата XXI века и их социо-экологические последствия // Проблемы социально-экологического мониторинга. Глобальные и региональные последствия изменений окружающей среды и климата: Материалы VII Байкальской школы-семинара. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 8—22.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Болтнева Л. И. и др. Информационная система „Последствия изменения климата для климатозависимых отраслей хозяйства Российской Федерации” // Глобальные изменения климата: Сборник научных трудов. М.: Гидрометеиздат, 2002. С. 448—464.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Гитарский М. Л. и др. Последствия изменения климата для России // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2001. С. 40—64.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Елисеев Д. Е. Адаптация водного хозяйства Российской Федерации к изменениям климата // Глобальные изменения природной среды и климата. М.: РАН, 1997. С. 373—391.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Елисеев Д. А. Разработка мер адаптации водного хозяйства РФ к изменениям климата // Глобальные изменения природной среды и климата. М.: РАН, 1997. С. 20.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Остромогильский А. Х., Семевский Ф. Н., Семенов С. М., Колесникова В. Н. Имитационно-балансовая математическая модель региона оз. Байкал как инструмент всестороннего анализа, долгосрочного прогнозирования и определения допустимых нагрузок воздействия хозяйственной деятельности на качество окружающей среды и состояние экологической системы // Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды II советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 246—265.

Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Чебаненко Б. Б. и др. Комплексный анализ окружающей природной среды и мониторинга в регионе оз. Байкал // Всесторонний анализ окружающей природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 43—59.

Израэль Ю. А., Воронская Г. Н., Колесникова В. Н. и др. Мониторинг атмосферы — обоснование приоритетности загрязнителей, оценка фоновой региональной и глобальной составляющих загрязнения // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Т. 1. С. 7—18.

Израэль Ю. А., Гасилина Н. К., Болтнева Л. И. и др. Научные и организационные принципы прогнозирования воздействия КАТЭК на окружающую природную среду // Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды IV советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 13—20.

Израэль Ю. А., Гитарский М. Л., Карабань Р. Т. и др. Последствия изменения климата для лесного хозяйства и стока диоксида углерода в лесах России // Глобальные изменения климата и их последствия для России. М., 2002. С. 337—366.

Израэль Ю. А., Де Корт М., Квасникова Е. В., Келли Н., Матвеевко И. И., Назаров И. М., Стукин Е. Д., Табачный Л. Я., Цатуров Ю. С., Герменчук М. Г. Представление пространственных особенностей радиоактивного загрязнения в Атласе выпадений цезия в Европе после Чернобыльской аварии // Радио-

активность при ядерных взрывах и авариях: Труды Международной конференции. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. Т. 1. С. 146—152.

Израэль Ю. А., Имщенник Е. В., Квасникова Е. В., Назаров И. М., Стукин Е. Д. и др. Радиоактивное загрязнение территории России глобальными выпадениями от ядерных взрывов и Чернобыльскими выпадениями. Карта по состоянию на 90-е годы XX века // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: Труды Международной конференции. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. Т. 1. С. 138—145.

Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Петров В. Н. и др. Моделирование глобального воздействия на озоносферу возможной ядерной войны // Атмосферный озон: Труды VI Всесоюзного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 15—21.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М., Стукин Е. Д. Радиационный мониторинг // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2001. С. 93—155.

Израэль Ю. А., Квасникова Е. В., Назаров И. М., Стукин Е. Д., Цатуров Ю. С. Радиоактивное загрязнение территории стран СНГ и Европы // Экологическая безопасность на пороге XXI века: Международная конференция. СПб., 1999. С. 88—89.

Израэль Ю. А., Кунина И. М. Экологические эффекты УФ-радиации в области В на растительность суши // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. Т. 16. С. 9—22.

Израэль Ю. А., Лысак А. В., Назаров И. М. О национальной системе по наблюдению и оценке переноса на большие расстояния загрязняющих воздух веществ // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды: Труды Международного симпозиума. Л., 1980. С. 148—153.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Анохин Ю. А. и др. Экологический подход к оценке состояния и регулирования качества окружающей природной среды // Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды III советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 101—130.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Василенко В. Н. и др. Радиоактивное загрязнение Уральского региона производственным объединением „Маяк” // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: Международная конференция. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. С. 411—424.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Рябошапка А. Г. Подходы к нормированию атмосферных загрязнений при дальнем и трансграничном переносе // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения природной среды: Труды II Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 351—358.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Фридман Ш. Д., Квасникова Е. В. Атлас радиоактивного загрязнения территорий — итог систематизации данных мониторинга радиоактивных выпадений // Методика и некоторые результаты авиационной гамма-съемки радиоактивного загрязнения Европейской части России: Сборник статей ИГКЭ. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. С. 5—15.

Израэль Ю. А., Назаров И. М., Фридман Ш. Д., Квасникова Е. В. Радиоактивное загрязнение цезием-137 территории Европейской части СНГ в 1992 г. в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Методика и некоторые результаты радиоактивного загрязнения территории Европейской части России. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. С. 16—51.

Израэль Ю. А., Новиков Ю. В. Исследование антропогенных загрязнений водных бассейнов с использованием интерактивного метода обработки космической информации // Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана: Труды I Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Т. 3. С. 205—215.

Израэль Ю. А., Новиков Ю. В. Космический геоэкологический мониторинг антропогенного состояния природной среды // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Труды III Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 308—316.

Израэль Ю. А., Новиков Ю. В., Афанасьев Ю. А. Использование космической информации для изучения антропогенных загрязнений и их воздействий на окружающую среду // Труды 34-го Конгресса МАФ. Будапешт, 1983.

Израэль Ю. А., Петров В. Н. Распространение радиоактивных продуктов подземных ядерных взрывов на большие расстояния // Атомные взрывы в мирных целях. М.: Атомиздат, 1970. С. 87—93.

Израэль Ю. А., Петров В. Н. Диффузия и осаждение радиоактивных продуктов из облака подземного ядерного взрыва // Peaceful Nuclear Explosions IV. Viena, 1975. P. 355—367.

Израэль Ю. А., Петров В. Н. Атмосферный перенос и динамика выхода радионуклидов после Чернобыльской аварии // Радионуклиды в пищевых цепях: Труды Международного симпозиума. Вена: Шпрингер, 1988.

Израэль Ю. А., Петров В. Н. Процедуры по оценке и принятию мер для безопасности населения после Чернобыльской аварии // Радионуклиды в пищевых цепях: Труды Международного симпозиума. Вена: Шпрингер, 1988.

Израэль Ю. А., Прессман А. Я., Батаев К. Г., Стукин Е. Д. Распространение радиоактивных продуктов в зоне разрушенной горной породы при камуфлетном ядерном взрыве и расчет возможного загрязнения нефти при интенсификации ее добычи // Peaceful Nuclear Explosions II Their Practical Application: Proceedings of a panel on the practical applications on the peaceful uses of nuclear explosions organized by the International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 1971. P. 283—293.

Израэль Ю. А., Ровинский Ф. Я. Комплексный фоновый мониторинг в СССР // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Труды III Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 89—105.

Израэль Ю. А., Семевский Ф. Н. Изменения экосистем, вызываемые адвентивными видами // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. Т. 17. С. 7—16.

Израэль Ю. А., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Об оценке влияния применения инсектицидов на устойчивость экосистем в глобальном масштабе // Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды V советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 46—56.

Израэль Ю. А., Семенов С. М. Экологические горизонты // Международная конференция ВМО по моделированию загрязнения атмосферы и его применениям. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 3.

Израэль Ю. А., Семенов С. М. Использование биосферных заповедников СССР для осуществления фонового мониторинга состояния биоты // Загрязнение атмосферы в регионе Балтийского моря: миграция загрязняющих веществ и их воздействие на окружающую среду. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 125—138.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Кунина И. М. Комплексный подход при осуществлении экологического нормирования загрязнения экосистем // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1988. Т. 11. С. 10—22.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Кунина И. М. Загрязнение атмосферы регионального и глобального масштабов: оценка последствий воздействия на растительность суши и проблема экологического нормирования // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Т. 12. С. 10—17.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Кунина И. М. Экологическое нормирование: методология и практика // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1991. Т. 13. С. 10—24.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Хачатуров М. А. Биоклиматология и актуальные проблемы оценки последствий глобального изменения климата для экосистем суши // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1992. Т. 14. С. 8—20.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Хачатуров М. А. Биоклиматологические аспекты комплексного глобального мониторинга // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. Т. 15. С. 8—21.

Израэль Ю. А., Семенов Ю. А., Эскин В. И. Имитационная модель для оценки влияния усиления парникового эффекта на сезонный ход температуры в приповерхностном слое литосферы // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. Т. 18. С. 9—22.

Израэль Ю. А., Семенов С. М., Эскин В. И. Парниковый эффект и его возможное антропогенное усиление // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. Т. 19. С. 7—20.

Израэль Ю. А., Соколовский В. Г., Соколов В. Е. и др. Экологические последствия радиоактивного загрязнения природных сред в районе аварии Чернобыльской атомной электростанции: Доклад для представления на XIV сессию Совета управляющих ЮНЕП. М.: Гидрометеиздат, 1987.

Израэль Ю. А., Тер-Сааков А. А. Образование радиоактивных частиц при ядерных взрывах в тропосфере // Труды ИЭМ. 1997. Вып. 21. Ч. I. С. 91—97.

Израэль Ю. А., Тер-Сааков А. А., Ветров В. А., Красилов Г. А. Активация горных пород и формирование носителей радиоактивных продуктов при подземных ядерных взрывах // Peaceful Nuclear Explosions III Proceedings of a panel on the practical applications on the peaceful uses of nuclear explosions organized by the International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 1972. P. 389—410.

Израэль Ю. А., Тер-Сааков А. А., Казаков Ю. Е. Особенности радиоактивного загрязнения атмосферы и местности при одиночных и групповых подземных ядерных взрывах с выбросом грунта // Атомные взрывы в мирных целях. М.: Атомиздат, 1970. С. 103—123.

Израэль Ю. А., Тищенко О. П., Щетинин Н. Н. Адсорбционный метод определения концентрации радона в воздухе с самолета // Радиоактивные изотопы и их использование в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965. С. 466—472.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Анохин Ю. А. и др. Комплексный фоновый мониторинг окружающей природной среды на Байкале: цели и задачи, история и перспективы // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей при-

родной среды: Труды II Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 78—85.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Методические аспекты осуществления фоновых мониторинга состояния биоты суши // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 9. С. 8—21.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Методические основы экологического мониторинга в биосферных заповедниках // Опыт и методы экологического мониторинга. Пущино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1978. С. 10—16.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Теоретические и прикладные аспекты фоновых экологического мониторинга состояния биоты // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. Т. 3. С. 7—23.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Экологический мониторинг и регулирование состояния природной среды // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. Т. 4. С. 6—19.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Влияние фоновых загрязнений среды на биоту: проблемы оценки и прогноза // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1982. Т. 5. С. 6—18.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Фоновый мониторинг и анализ причин глобальных изменений в состоянии биоты // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1983. Т. 6. С. 4—15.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. О некоторых глобальных экономических эффектах фоновых загрязнений природной среды // Научное обоснование системы мониторинга окружающей среды: Труды I советско-французского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 6—18.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. К проблеме оценки и прогноза изменений состояния экосистем // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Т. 7. С. 9—26.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. К проблеме экологических последствий загрязнения природной среды инсектицидами // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Т. 8. С. 7—21.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Нарушение устойчивости экосистем суши вследствие антропогенных воздействий глобального масштаба // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Труды III Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 9—19.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Экологические эффекты загрязнения природной среды глобального масштаба // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1987. Т. 10. С. 10—21.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Инсаров Г. Э., Семенов С. М., Карabanь Р. Т., Назаров И. М. Экологические эффекты загрязнения атмосферы сернистым газом // Актуальные проблемы охраны природной среды в Советском Союзе и Федеративной Республике Германии: Труды II Симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1987. Т. 1. С. 221—245.

Израэль Ю. А., Филиппова Л. М., Семевский Ф. Н., Инсаров Г. Э., Семенов С. М. О некоторых теоретических аспектах экологического мониторинга состояния природной среды // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1979. Т. 2. С. 7—29.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Современное состояние Мирового океана. Проблемы регионального и глобального мониторинга // Актуальные проблемы охраны окружающей среды в Советском Союзе и Федеративной Республике Германии: Труды Научного симпозиума. Мюнхен, 1981.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экологические основы мониторинга Мирового океана // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей среды: Тезисы докладов II Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1981.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экологические основы мониторинга состояния Мирового океана // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды: Труды II Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 44—62.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Научное обоснование системы мониторинга среды Балтийского моря // Тезисы докладов II Всесоюзного съезда океанографов. Биология моря. Вып. 5. Севастополь, 1982.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экологические последствия загрязнения Тихого океана // Тезисы докладов XV Конгресса Тихоокеанской научной ассоциации. М., 1982.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экология и проблемы комплексного глобального мониторинга Мирового океана // Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана (МОНОК): Тезисы докладов. М., 1983.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экологические последствия загрязнения Мирового океана // Исследование океана: Материалы II Съезда океанологов. М.: Наука, 1984. С. 69—86.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Атмосферные переносы загрязняющих веществ и их влияние на процессы взаимодействия океана и атмосферы // Экологические последствия загрязнения океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 7—24.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Экология и проблемы комплексного глобального мониторинга Мирового океана // Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана: Труды I Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 19—48.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Оценка и прогноз состояния Балтийского моря // Проблемы биосферы. Вып. Географический прогноз: теория, методы, региональный аспект. М.: Наука, 1986.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Программа МОНОК — научное обоснование системы глобального экологического мониторинга океана // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Тезисы докладов II Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1986.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Основные проблемы антропогенной экологии // Основные проблемы исследования Мирового океана: Пленарные доклады III съезда советских океанологов. Л.: Гидрометеиздат, 1989.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Гребмайер Дж. М., Смит Г. Дж. Экологическая ситуация в арктических морях // Динамика экосистем Берингова и Чукотского морей. М.: Наука, 2000. С. 15—38.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Кудрявцев В. М. и др. Воздействие биологически активной УФ-радиации на важнейшие биологические процессы в высоких широтах // Динамика экосистем Берингова и Чукотского морей. М.: Наука, 2000. С. 336—353.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Кудрявцев В. М. и др. Критические воздействия загрязняющих веществ на отдельные биологические процессы в арктических морях // Динамика экосистем Берингова и Чукотского морей. М.: Наука, 2000. С. 283—297.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Панов Г. В. и др. Всесторонний анализ экосистемы Берингова моря // Всесторонний анализ окружающей природной среды: Труды V советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 77—111.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Симонов А. И. Научные аспекты комплексного исследования Тихого океана с целью предотвращения его загрязнения // Труды XIV Тихоокеанского научного конгресса. М.: Наука, 1981.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Симонов А. И. Научные аспекты комплексного исследования вод Тихого океана с целью предотвращения его загрязнения // Труды XIV Тихоокеанского научного конгресса. М.: Наука, 1981.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Щука С. А. Экологическое состояние отдельных морей России // Труды Итоговой научно-технической конференции по результатам 1-го этапа ФЦП „Мировой океан”.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Щука Т. А. и др. Состояние Мирового океана и проблема экологически устойчивого развития // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2001. С. 65—92.

Израэль Ю. А., Цыбань А. В., Щука С. А., Мошаров С. А. Экосистемные изменения в Мировом океане в связи с антропогенным воздействием, включая изменения климата // Глобальные изменения климата и их последствия для России. М., 2002.

Израэль Ю. А., Черногаева Г. М. Состояние природной среды в Российской Федерации к концу XX века по данным полувекового мониторинга // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2001. С. 10—17.

Назаров И. М., Израэль Ю. А., Гитарский М. Л. и др. Проблема антропогенного воздействия на климат и Киотский протокол // Труды Всемирной конференции по изменению климата. М.: Гидрометеиздат, 2004.

Цыбань А. В., Израэль Ю. А. Программа МОНОК — научное обоснование системы глобального экологического мониторинга океана // Комплексный глобальный мониторинг состояния биосферы: Труды III Международного симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 3. С. 7—24.

Яншин А. Л., Бudyко М. И., Израэль Ю. А. Глобальное потепление и его последствия: стратегия принимаемых мер // Глобальные проблемы биосферы. М.: Наука, 2001. С. 10—24.

Anokhin Yu. A., Izrael Yu. A. Systems analysis and simulation in regional approach // Proceedings of the USSR-US symposium. Washington, D.C., EPA, 1978. P. 68—82.

Izrael Yu. A. et al. Analysis of modern activity on regional climate change impact assessment // *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Impacts Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group II. Canberra, Australia. 1992.*

Izrael Yu. A. et al. Reconstruction of the real pattern of terrain radioactive contamination from accidents and nuclear tests based on present-day and other data // *Proc. Intern. Symp. Remediation and Restoration of Radioactive — contaminated Sites in Europe. ANTWERP., 1993, vol. 1, DOC XI — 5027/94. P. 325—350.*

Izrael Yu. A. et al. European Atlas on Radioactive Contamination // *17th International Cartographic Conference Proceedings 2. Barselona, 1995. P. 1828—1835.*

Izrael Yu. A., De Cort M., Jones A. R., Nazarov I. M., Fridman Sh. D., Kvasnikova E. V. et al. The Atlas of caesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident // *Proceeding of the First International Conference. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996.*

Izrael Yu. A., Fridman Sh. D., Nazarov I. M., Kvasnikova E. V., Stukin E. D. et al. Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. Possibilities of its further development // *Proceedings of the 18th International Cartographic Conference. Gavle, 1997. Vol.2. P. 635—640.*

Izrael Yu. A., Kvasnikova E. V., Nazarov I. M. et al. Mapping of dose-rate of gamma-irradiation by Caesium-137 over the Earth surface for the territory of Russia // *Proceedings of the 20th International Cartographic Conference. Beijing, China, 2001. P. 487—492.*

Izrael Yu. A., Kvasnikova E. V., Nazarov I. M., Stukin E. D., Sudakova E. A. Mapping of radionuclide contamination in Russia // *Proceedings of the 20th International Cartographic Conference. Beijing, China, 2001. P. 406—412.*

Izrael Yu. A., Kvasnikova E. V., Nazarov I. M., Stukin E. D., Fridman Sh. D. Atlas of radioactive contamination of European Russia, Belarus and Ukraine. Possibilities of its use and perspectives of development // *Proceedings of the 18th International Cartographic Conference. Gavle, 1997. Vol. 2. P. 646—653.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Der heutige Zustand des Weltmeeres. Das Problem einer komplexen globalen und regionalen Kontrolle // *Aktuelle Fragen des Umweltschutzes in der Sowjetunion und in der Bundesrepublik Deutschland. Wissenschaftliches Symposium, Munchen, 1981.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Ecological principles of the World Ocean Monitoring // *Integrated Global Monitoring of Environmental Pollution. L.: Gidrometeoizdat, 1983.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Ecology and problems of integrated Global Ocean Monitoring // *Integrated Global Ocean Monitoring (MONOC): abstracts. M.: Gidrometeoizdat, 1983.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Assessment and forecast of the state of the Baltic Sea // *Symposium on ecological investigations of the Baltic Sea Environment (under the auspices of the Baltic Marine Environ. Protection Commission-HELCOM). Helsinki, 1985.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Ecology and problems of the World Ocean Integrated Global Monitoring // *Integrated Global Ocean Monitoring: Proceedings of the First Intern. Symp. L.: Gidrometeoizdat, 1986. Vol. 1.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. Scientific justification for ecological rationing of anthropogenic impact upon marine environment (on the example of the Baltic Sea) // *Monitoring of the Baltic Sea: Thes. of the reports of the Intern. Symp. HELCOM. Helsinki, 1986.*

Izrael Yu. A., Tsyban A. V., T. Whitley et al. Polar marine ecosystems and climate // Results of the Third Joint US-USSR Bering and Chukchi Seas Expedition (BERPAC), Summer 1988. P.A. Nagel, ed. Washington, DC.: US Fish and Wildlife Service, 1992. P. 7—11.

Izrael Yu. A., Tsyban A. V. et al. Comprehensive analysis of the Bering Sea ecosystem // Monitoring and Managing Environmental Impact: American and Soviet Perspectives. Soviet and East European Affairs National Research Council. Washington, D.C., 1989.

O'Connor H., Izrael Yu. A., Tsyban A. V. et al. Program on long-term ecological investigations of the Bering Sea and other Pacific Ocean ecosystems (BERPAC Program) // Results of the Third Joint US-USSR Bering and Chukchi Seas Expedition (BERPAC), Summer 1988. P.A. Nagel, ed. Washington, DC.: US Fish and Wildlife Service, 1992. P. 3—6.

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Авдюшин С. И., Беликов С. К., Вакуловский С. М. Радиоактивное загрязнение цезием-137 Европейской части и Уральского региона России, территории Украины, Белоруссии, Молдавии, стран Прибалтики и Западной Грузии (по состоянию на январь 1993 г.) / Ю. А. Израэль, ред. — М., 1994.

Карта радиационной обстановки на территории Европейской части СНГ и государств Балтии по состоянию на январь 1993 г., М 1:2 500 000 / Ю. А. Израэль, ред. — Минск: Белкартография, 1993. — 2 л.

Карта радиационной обстановки на территории Европейской части СССР (по состоянию на декабрь 1990 г.). М 1:500 000 / Ю. А. Израэль, ред. — ГУГК СССР, 1991. — 38 топ. л.

Карта радиоактивного загрязнения Европейской части и Уральского региона России цезием-137 (по состоянию на январь 1993 г.). М 1:500 000 / Ю. А. Израэль, ред. — М., 1993. — 16 топ. л.

Карта современных (на 1997 г.) уровней загрязнения почв Южно-Уральского региона стронцием-90 от аварий 1957 и 1967 гг. на ПО „Маяк”. М 1:200 000 / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, В. М. Артемов и др. — М.: Межведомственная комиссия РФ по радиационному мониторингу, 2000.

Карта современных (на 1997 г.) уровней загрязнения почв Южно-Уральского региона цезием-137 от аварий 1957 и 1967 гг. на ПО „Маяк”. М 1:200 000 / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, В. М. Артемов и др. — М.: Межведомственная комиссия РФ по радиационному мониторингу, 2000.

Карты радиоактивного загрязнения почв стронцием-90 в пойме р. Теча на территории Курганской области по состоянию на 1998 г. М 1:25 000 / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, В. М. Артемов и др. — М.: Межведомственная комиссия РФ по радиационному мониторингу, 2000.

Карты радиоактивного загрязнения почв цезием-137 в пойме р. Теча на территории Курганской области по состоянию на 1998 г., М 1:25 000 / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, В. М. Артемов и др. — М.: Межведомственная комиссия РФ по радиационному мониторингу, 2000.

**РЕКОНСТРУКЦИИ ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУР
НА КАМЧАТКЕ И НА ОСТРОВЕ КУНАШИР
ПО ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ
ЗА ПОСЛЕДНИЕ 400 ЛЕТ**

**О. Соломина¹, Г. Джакоби², Р. Дарриго², А. Браунинг³,
Н. Еременко⁴, Я. Муравьев⁵**

¹ РФ, 109017 Москва, Старомонетный пер., д. 29, Институт географии РАН, solomina@gol.ru

² США, Обсерватория Ламонт-Дохерти, Палисад, Нью-Йорк, druid@ldeo.columbia.edu

³ Германия, Институт географии, Университет Штуттгарта

⁴ РФ, Заповедник „Курильский”, Южно-Курильск, Сахалинская область, magnoliy@sakhalin.ru

⁵ РФ, Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Реферат. В этой статье мы рассматриваем возможности палеоклиматических реконструкций в западном секторе Тихоокеанского региона на основе анализа годовичных колец деревьев. Показано, что наиболее перспективными из исследованных древесных пород этого региона в этом отношении являются дуб (*Quercus crispula*), тис (*Taxus cuspidata*) (о. Кунашир) и лиственница (*Larix cajanderi*) (п-ов Камчатка). На основе ширины годовичных колец дуба на о. Кунашир были реконструированы средние максимальные температуры июня—сентября с 1634 г. Две сводные хронологии ширины годовичных колец лиственницы на п-ове Камчатка были использованы для реконструкции температуры июня с 1632 г. и для качественной оценки изменчивости летних температур в этом регионе. Хронология дуба дает также основание для реконструкции тихоокеанской декадной осцилляции (PDO) за четыре столетия. Реконструкции показывают, что в XVII—XX вв. декадная изменчивость летней температуры на Камчатке и Аляске была сходной как по амплитуде колебаний, так и по времени наступления похолоданий и потеплений. Возможно, это сходство объясняет синхронность наступания ледников в этих двух районах. Изменчивость температуры лета на о. Кунашир согласуется ходом теплообеспеченности вегетационного периода на Аляске и Камчатке в период 1750—1850 гг., но позже это сходство исчезает. Возможно, это связано с изменением характера циркуляции в северной части Тихоокеанского региона в связи с окончанием „малого ледникового периода”. Светлые и выпадающие кольца лиственницы на Камчатке также могут использоваться как палеоклиматический индикатор: обычно они соотносятся с экстремально холодными и/или короткими летними сезонами. В хронологиях „Эссо” и „Кроноцкий” светлые кольца совпадают с выпадающими или предшествуют им на один год. Часть светлых колец может быть ассоциирована (с запаздыванием на 1—2 года) с известными „климатически эффективными” извержениями, однако это совпадение может быть и случай-

ным. Местные извержения, в том числе и имевшие глобальное климатическое влияние (например, Шивелуч 1965 и 1854 гг., Безымянный 1956 г.), на приросте колец лиственницы на Камчатке не отразились. Исключение составляет извержение Плоского Толбачика 1975 г., которое, однако, сказалось только на деревьях, непосредственно поврежденных в результате извержения, что привело к выпадению колец в 1976—1978 гг.

Ключевые слова. Палеоклимат, дендрохронология, ширина колец, Камчатка, Кунашир, тихоокеанская декадная осцилляция, светлые и выпадающие кольца.

SUMMER TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS OF THE LAST 400 YEARS IN KAMCHATKA AND KUNASHIR BASED ON TREE-RING ANALYSIS

*O. Solomina¹, G. Jacoby², R. D'Arrigo², A. Braeuninger³,
N. Eremenko⁴, Ya. Muraviev⁵*

¹ Institute of Geography RAS, Staromonetny, 29, 109017 Russia, Moscow, solomina@gol.ru

² USA, Lamont-Doherty, Palisades, New York, druid@ldeo.columbia.edu

³ Germany, Institute of Geography, University of Stuttgart

⁴ Natural Reserve "Kuril'sky", Yuzhno-Kuril'sk, Sakhalinskaya oblast', Russian Federation, magnoliy@sakhalin.ru

⁵ Institute of Volcanology DVO RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russian Federation

Abstract. The potential of tree-ring chronologies from different species for paleoclimatic reconstructions in the western North Pacific region (Kamchatka and Kurile Islands) is considered in this paper. The most useful species are oak (*Quercus crispula*), Japanese yew (*Taxus baccata*) (Kunashir Island) and larch (*Larix cajanderi*) (Kamchatka peninsula). Based on oak ring widths, summer temperatures (June—September) since 1634 were reconstructed for Kunashir Island. Two composite larch chronologies for the Kamchatka peninsula are used for a qualitative estimation of summer temperature, and a reconstruction of June temperatures since 1632 was developed. The oak chronology is also used to reconstruct PDO variations during the last four centuries. Decadal variations of summer temperature in Kamchatka and Alaska during the last 400 years were found to be similar in amplitude and timing. This similarity may help explain the synchrony of glacier advances in the two regions described earlier by Solomina and Calkin (2003). The decadal variations of summer temperature at Kunashir are similar to those in Kamchatka and Alaska for the period 1750—1850, but after 1850 the similarity disappears. Light rings and missing rings can be used as paleoclimatic indicators for unusually cool early summers or short warm seasons. Light rings in the Esso and Kronotsky (Kamchatka) chronologies coincide with missing rings or precede them by one year. Some light rings can be associated with well-known climatically worldwide effective volcanic eruptions with

a lag of 1—2 years. On the contrary, local eruptions, even including those ones which had a global climatic effect (e.g., Shiveluch, 1965, 1854, Bezimianny, 1956), are not reflected in the Kamchatka light ring and missing ring chronologies. One exception is the eruption of Plosky Tolbachik in 1975, which directly damaged trees and led to the absence of the growth rings of 1976—1978.

Keywords. Paleoclimate, tree ring analysis, ring width, Kamchatka, Kunashir, Pacific Decadal Oscillation, light and missing rings.

Введение

Короткие и редкие ряды метеорологических наблюдений ограничивают возможности климатического прогноза. Это бесспорное положение в полной мере приложимо к Северотихоокеанскому региону, где систематические массовые метеорологические наблюдения начались меньше столетия назад. Поскольку изменения климата оказывают влияние на многие природные системы, в частности влияют на прирост деревьев, улов рыбы, баланс массы ледников и др., эти последние, в свою очередь, могут быть использованы как косвенные индикаторы колебаний климата в прошлом.

Среди косвенных климатических индикаторов дендрохронология — один из самых перспективных методов. Он позволяет восстанавливать метеорологические параметры прошлого с годичным разрешением — за последние сотни лет, если используются только живые деревья, и за несколько тысячелетий, если привлекается погребенный материал. В основе метода лежит давно известное свойство деревьев умеренной и субполярной зоны образовывать годичное кольцо, параметры которого (ширина, плотность и др.) зависят от климата. Особенно чувствительны к климатическим изменениям деревья, растущие на пределах своего ареала, на верхней/нижней границе леса, на побережье океана.

В западном секторе Северотихоокеанского региона дендроклиматические реконструкции пока довольно немногочисленны. Мы исследовали возможности разных пород деревьев — лиственницы и березы на Камчатке, дуба, березы и тиса на о. Кунашир — для реконструкции климата этого района. Ниже мы приводим результаты этих исследований, а также сравниваем две реконструкции летних температур, построенные для Камчатки и о. Кунашир, и рассматриваем их в контексте изменений климата всего Северотихоокеанского региона.

Районы работ

О. Кунашир

Кунашир, самый южный в цепочке Курильских островов, отличается прохладным, морским климатом с длительной относительно мягкой зимой и прохладным летом. Зимой здесь господствуют западные ветры, ду-

ющие с холодного материка и Охотского моря. Летом преобладают ветры с востока и юго-востока, которые несут много водяных паров. В результате летом на Курилах стоит облачная, прохладная погода и наблюдается большое число дней с туманами. Метеорологическая обстановка осложняется влиянием морских течений — холодного Ойясио и теплых Куроиси и Цусимского. Благодаря влиянию ветви теплого течения, подходящей со стороны Охотского моря, западная часть острова немного теплее восточной.

Видовой состав растительности острова очень разнообразен. На Кунашире широко встречаются леса из темнохвойных пород — елей иезской (*Picea jezoensis*) и Глена (*Picea glehnii*) и пихты сахалинской (*Abies sachalinensis*), которые поднимаются до высоты 150—300 м над уровнем моря. Ель иезская и пихта также образуют хвойно-широколиственные леса с многопородным составом. Выше темнохвойного леса располагается пояс лесов из березы каменной (*Betula ermanii*), часто с подлеском из бамбучника (*Sasa*). Кедровый стланик (*Pinus pumila*) и ольховник кустарниковый (*Duschekia fruticosa*) доминируют в верхнем поясе гор (Баркалов, Еременко, 2003). В наиболее благоприятных условиях на острове встречаются рощи из широколиственных пород деревьев: клена Майра (*Acer mayrii*), дубов кудрявенького (*Quercus crispula*) и зубчатого (*Quercus dentata*), ильма японского (*Ulmus japonica*).

Кунашир в дендрохронологическом отношении представляет собой важный и перспективный район исследования. Состав древесной флоры острова очень богат, а термический фактор является определяющим для прироста древесины в условиях прохладного влажного климата Кунашира. Ряды метеонаблюдений на острове не превышают нескольких десятилетий, поэтому продолжение их в прошлое является насущной задачей. На острове работает одна длиннорядная метеостанция (Южно-Курильск), расположенная в 25 км к северо-востоку от места отбора образцов дуба. Среднемесячные данные о максимальных, средних и минимальных температурах и среднемесячных осадках охватывают период с 1947 по 1989 г. В работе использованы данные глобальной климатической сети (Global Historical Climate Network (GHCNv2)). Насколько нам известно, до наших работ в 2002 г. дендроклиматические исследования в этом районе не проводились.

Полуостров Камчатка

Климат Камчатки из-за ее более северного положения и охлаждающего влияния Охотского моря более суров, чем климат Кунашира, а растительный мир существенно беднее. Восточный берег Камчатки отличается морским климатом с прохладным сырым летом и многоснежной зимой. Здесь распространены леса из каменной березы (*Betula ermanii*). В центральной части полуострова, где сосредоточены основные массивы лист-

венничных лесов (*Larix cajanderi*), климат более континентальный с теплым летом и холодной, но менее снежной зимой.

Метеорологические наблюдения начались здесь в 1890-х годах (Петропавловск-Камчатский) и в разные годы проводились на метеостанциях Ключи, Козыревск, Эссо и др. Для нашего анализа мы использовали среднемесячные значения температур и осадков, измеренных на этих станциях.

Дендрохронологические исследования на Камчатке начались в 1970-х годах (см. обзор Solomina, 1999), но только после работы Шиятова, представленной в международном банке дендрохронологических данных (ITRDB), камчатские хронологии лиственницы были тщательно датированы. Установлено (Gostev et al., 1996; Solomina et al., 1999; Solomina et al., 2000; Furuta et al., 2002), что прирост лиственницы на верхней границе леса зависит главным образом от температуры мая—июня текущего года, однако корреляция метеопараметров с шириной колец не очень высока (коэффициент корреляции 0,4—0,5). Поиск новых более чувствительных образцов, увеличение статистической обеспеченности хронологий образцами все еще является актуальной задачей для этого района.

Места отбора образцов и возраст деревьев

Рекогносцировочные исследования на о. Кунашир проводились в 2002 г. на склонах вулкана Менделеева, в районе мыса Столбчатый, в районе Тятинского и Саратовского кордонов, в окрестностях пос. Головинно, Дубовое, в районе кальдеры вулкана Головинна, в „Брянском лесу” (за Серноводским перешейком). Установлено, что наиболее долгоживущими и чувствительными в отношении климатических изменений на Кунашире являются дуб кудрявенький, тис остроконечный и береза каменная. Максимальный возраст дубов и тисов, определенный дендрохронологическим методом, достигает 300—400 лет, берез — до 200 лет. Истинный возраст многих деревьев несколько больше, так как многие экземпляры поражены сердцевинной гнилью. Отдельные экземпляры кленов и вязов также имеют значительный (до 200—250 лет) возраст, однако такие деревья встречаются редко, и поэтому эти древесные породы менее перспективны для дендроклиматических исследований. Интересно, что лиственницы, растущие вблизи морского побережья, оказались очень молодыми — не старше 50—70 лет, хотя изогнутые угнетенные деревья причудливой формы выглядят высоковозрастными. Эти деревья являются искусственными посадками возле поселков.

Образцы дуба были отобраны в „Брянском лесу”, примерно в 1 км от Тихоокеанского побережья. Помимо дубов (*Quercus crispula*) в этом лесу встречается каменная береза (*Betula ermanii*), хотя дуб все же доминирует. Нижний ярус представляет собой преимущественно бамбучниковые заросли с участками высокотравья. Всего было пробурено 34 дерева, но

Хронологии годичных колец на Камчатке и Кунашире, использованные в этой работе

Код хронологии	Место отбора образцов	Порода деревьев	Высота (м над ур. моря)	Количество деревьев (радиусов)	Продолжительность (годы)	Количество выпадающих колец	Источник
Камчатка							
KR	Плоский Толбачик	Лиственница	600—900	11(19)	1720—1990	8	Solomina et al., 1999
KTL	То же	То же	750	12(23)	1720—1983	0	Shyatov, ITRDB
ESS	Эссо	„	700—800	13(26)	1632—1993	24	Solomina et al., 2000
ESN	То же	„	700—800?	16(32)	1704—1997	22	Solomina et al., 2000
KEL	„	„	900	16(25)	1689—1984	9	Shyatov, ITRDB
BY	„	„	700	12(27)	1670—1992	0	Gostev et al., 1996
AV	Окрестности Петропавловска	Береза	700 и 900	9(19)	1774—1992	0	Gostev et al., 1997
Birch	Предполя Авачи	То же	600	5(10)	1809—1990	1	Solomina et al., 2000
Кунашир							
TAX	Сборная	Тис	Уровень моря	9(18)	1800—2002	0	Публикуется впервые
BRL	„Брянский лес”	Дуб	То же	20(30)	1634—2002	0	Jacoby et al., в печати

часть образцов оказалось невозможно использовать для анализа из-за плохого качества кернов или сердцевинной гнили, разрушившей древесину (табл. 1). Образцы тиса (15 деревьев) и березы (10 деревьев) отобраны частично в том же лесу, частично в других указанных выше пунктах.

На Камчатке образцы для трех хронологий лиственницы были отобраны в 1990, 1995 и 1997 гг. в районе поселка Эссо и на верхней границе леса вулкана Плоский Толбачик. По случайному совпадению места отбора наших образцов оказались неподалеку от площадок, исследованных Шиятовым в 1980-х годах (хронологии KTL, KEL) (см. табл. 1). Все образцы отобраны вблизи верхней границы леса в разреженных древостоях. В отличие от Плоского Толбачика, где часто происходят извержения вулканов, в районе Эссо проявлений современного вулканизма не обнаружено. Однако обе популяции лиственницы в районе Эссо после 1990-х годов подвергались пожарам. Образцы березы (5 деревьев) отобраны на южном склоне Авачинского вулкана. Возраст самых старых экземпляров составляет около 200 лет.

Методика анализа. Перекрестное датирование.

Построение хронологий

Отбор образцов проводился путем кернавого бурения с применением методики очистки бура и обработки пробуренного отверстия, разработанной и запатентованной А. Г. Савченко (Савченко, 1994). Этот метод хорошо зарекомендовал себя в условиях влажного климата Кунашира, где проникновение патогенных бактерий и грибов особенно опасно для деревьев.

Отобранные образцы упаковывались в специальные контейнеры, и их дальнейшая обработка проводилась в лабораторных условиях. Здесь керны фиксировались, полировались и анализировались под микроскопом согласно стандартным процедурам, принятым в дендрохронологии (см., например, Cook, Kairiukstic, 1990). Для анализа отбирались наиболее старые деревья, керны которых имели наилучшую сохранность, а годовичные кольца наиболее ясно различались под микроскопом.

Построению хронологий предшествует процедура перекрестного датирования колец. Для этого выявляются наиболее характерные кольца и все образцы датируются относительно этих колец. Процедура проводится как вручную, графически, так и с помощью стандартной программы COFESHA (Holmes, 1994). Образцы березы с трудом поддаются датированию, поскольку многие кольца видны неотчетливо, однако при достаточно большом количестве образцов построение хронологии возможно. К настоящему моменту нам удалось свести в единую предварительную хронологию образцы, отобранные на склоне Авачи; образцы березы с о. Кунашир датировать пока не удалось. Годовичные кольца у тиса обычно лучше различимы, хотя иногда в пределах годовичного кольца наблюдаются ложные гра-

ницы. К настоящему времени нам удалось провести перекрестное датирование 18 кернов для интервала 1800—2002 гг., однако эта хронология еще нуждается в усовершенствовании и пополнении новыми образцами. Наибольший успех на Кунашире был достигнут в датировании колец дубов: в хронологию удалось объединить 30 кернов от 20 деревьев.

Перекрестное датирование образцов лиственницы с Камчатки весьма серьезно осложнялось наличием выпадающих колец. Всего в пяти хронологиях лиственницы обнаружено 44 выпадающих кольца. Тем не менее нам удалось построить три хронологии — одну (KR) для вулкана Плоский Толбачик и две (ESS, ESN) для окрестностей поселка Эссо. Все три хронологии характеризуют условия верхней границы леса, где прирост колец термически обусловлен. Высокая корреляция между этими хронологиями и хронологиями Шиятова (коэффициент корреляции от 0,61 до 0,87) и проверка на взаимную корреляцию между всеми образцами позволяют объединить три хронологии (ESS, ESN, KEL) в хронологию „Эссо” и две (KR, KTL) — в хронологию „Толбачик”. Интересно, что хронологии с верхней границы леса у активного вулкана Толбачик имеют сходство с хронологиями у поселка Эссо ($R = 0,57$), где вулканическая деятельность отсутствует. Все образцы могут быть также сведены в единую хронологию (ТОК).

Для устранения возрастного тренда, т. е. не связанной с климатом составляющей, при построении хронологии для каждого образца (керна или дерева) рассчитываются индексы ширины кольца как отклонение величины каждого кольца от кривой, описывающей этот тренд. Подбор кривой проводится индивидуально в зависимости от задач исследования. Для реконструкции долгопериодных климатических колебаний часто выбирается негативная экспонента; если объектом исследования являются годовые аномалии — кривая с периодом сглаживания 20—30 лет. Стремясь сохранить как высокочастотный, так и низкочастотный сигналы, мы использовали наиболее консервативный метод индексирования, рассчитывая индексы как отклонения от негативной экспоненты или просто линейного тренда. Поскольку в результате индексирования долгопериодный климатический сигнал все же до некоторой степени может быть искажен (см., например, Cook, Kairiukstic, 1990), мы сосредоточиваем внимание на внутривековых ритмах климатической изменчивости и на распределении годовых экстремумов.

Для расчета индексов прироста и построения итоговых хронологий использовалась программа ARSTAN (Cook, Kairiukstic, 1990). Затем значения индексов сравнивались со среднемесячными (а также максимальными и минимальными, где это возможно) значениями температур и осадков, измеренных на ближайших к месту отбора образцов длиннорядных метеостанциях. Для реконструкции метеорологических параметров использовался метод линейной регрессии. Подбор реконструируемых климатических параметров производился эмпирически. При этом учитывались не только значимость и теснота корреляционных связей, но и их экофизиологическая обусловленность.

Результаты

Для дендроклиматического анализа мы использовали четыре хронологии: хронологию тиса (TAX) и дуба (BRL) (рис. 1) на о. Кунашир и сводные хронологии лиственницы для района Эссо (ESSO) и вулкана Плоский Толбачик (TOLB) (рис. 2), а также для сравнения предварительную хронологию березы из предгорий вулкана Авача (см. рис. 6).

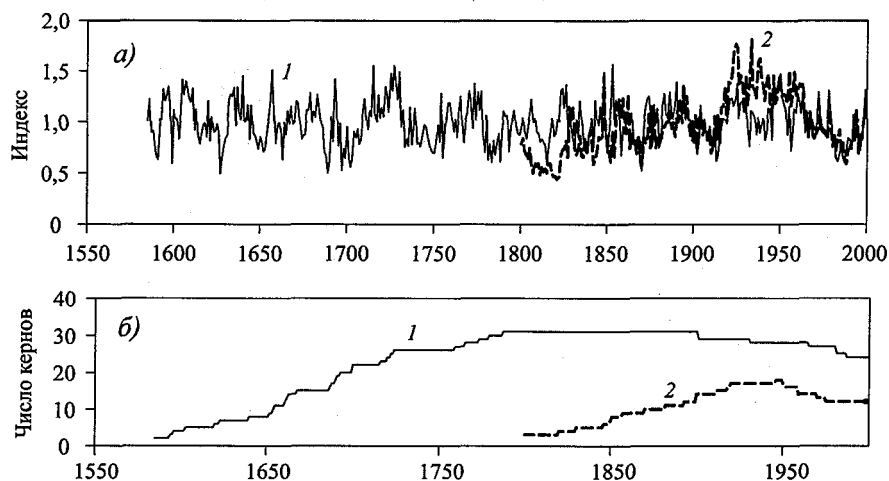


Рис. 1. Хронологии дуба (1) и тиса (2), о. Кунашир.

a — индексы ширины годичных колец, *б* — число кернов.

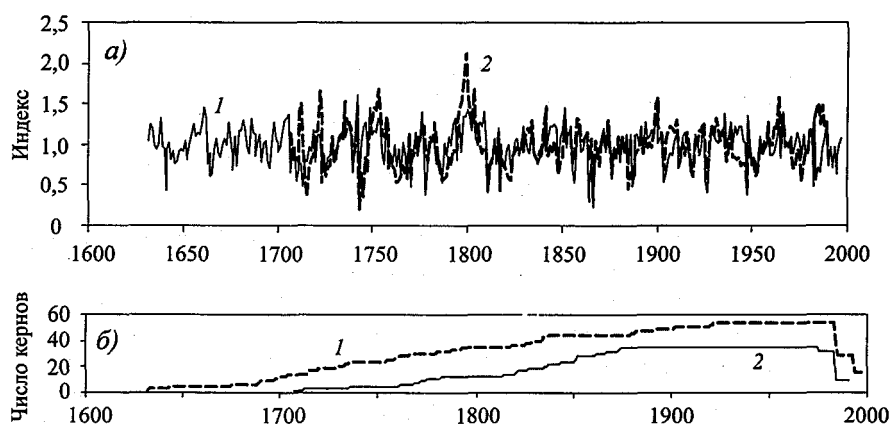


Рис. 2. Хронологии лиственницы, п-ов Камчатка, для Эссо (1) и Толбачик (2).

a — индексы ширины годичных колец, *б* — число кернов.

Хронологии годовичных колец и летняя температура

Корреляции среднемесячных (а для Южно-Курильска и средних максимальных и минимальных) температур с перечисленными выше хронологиями рассчитывались для каждого из 24 месяцев годов, предшествующих формированию кольца. Для хронологии дуба (BRL) наивысшая корреляция обнаружилась с максимальными месячными температурами за июнь—сентябрь по станции Южно-Курильск (рис. 3). Прирост колец дуба

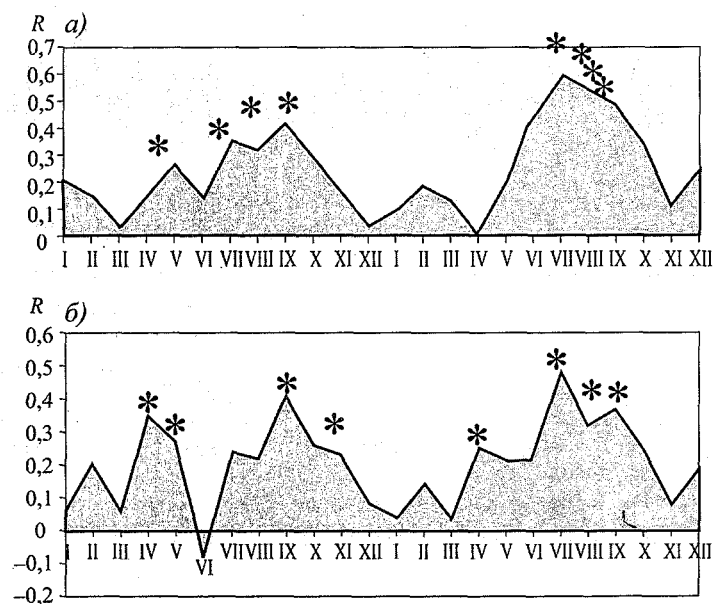


Рис. 3. Корреляции между индексами прироста дуба (а) и тиса (б) и максимальными средними температурами, измеренными на метеостанции Южно-Курильск.

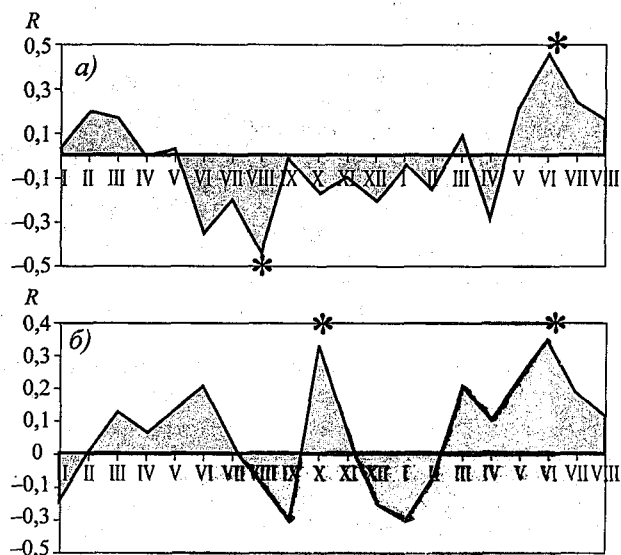
Звездочками отмечены коэффициенты корреляции (R), значимые на 0,05-м уровне.

здесь зависит, хотя и в меньшей степени, и от летних температур предыдущего года. Заметим, что средние максимальные температуры на о. Кунашир коррелируют со среднемесячными температурами с коэффициентом корреляции $R = 0,81$. Корреляции с осадками незначимы. Хронология тиса обнаруживает сходную реакцию на климатические параметры (см. рис. 3), однако статистические связи в этом случае несколько слабее. Использование японской станции Немуро (1880—1990 гг.) показало, что установленная закономерность — корреляции индексов прироста с максимальными среднемесячными температурами июня, июля, августа и сентября — прослеживается и на более длинном ряду.

Хронология „Эссо” сравнивалась со среднемесячными температурами и осадками метеостанции Эссо. Ряд наблюдений на метеостанции — с 1941 по 1996 г. — с пропусками (всего 33 полных года). Ближайшая к месту отбора образцов для хронологии Плоский Толбачик — метеостанция Ключи с рядом наблюдений 57 лет (с 1927 по 1990 г. с пропусками). Значимые корреляции обнаружены для обеих хронологий и температуры июня (рис. 4). Статистически значимые коэффициенты корреляции для августа (Эссо) и октября (Толбачик) предыдущего года, скорее всего, являются случайными и объясняются короткими рядами метеорологических наблюдений. В отличие от этих двух случаев, корреляции с июньскими температурами установлены для двух независимых хронологий, а также были описаны предшествующими исследователями (см., например, Gostev et al., 1996). Объединение нескольких метеостанций в единый ряд (Петропавловск, Эссо, Ключи, Семьячик) не улучшают корреляции. Сводная хронология (ТОК) коррелирует с июньской температурой отдельных метеостанций, но с более низким коэффициентом корреляции, чем две локальные хронологии „Эссо” и „Толбачик”. Индексы прироста березы (AV) коррелируют с июльскими температурами текущего года (коэффициент корреляции $R = 0,43$, Петропавловск-Камчатский за период 1883—1990 гг.). Установленные статистические связи ширины колец с температурой воздуха летних месяцев, имеющие экофизиологический смысл, дают основание для реконструкции максимальной температуры с июня по сентябрь на о. Кунашир и средней июньской температуры на Камчатке (рис. 5, 6) методом линейной регрессии.

Рис. 4. Корреляции между индексами прироста лиственницы на Камчатке (а) и средними температурами, измеренными на метеостанциях Эссо и Ключи (б).

Звездочками отмечены коэффициенты корреляции R , значимые на 0,05-м уровне.



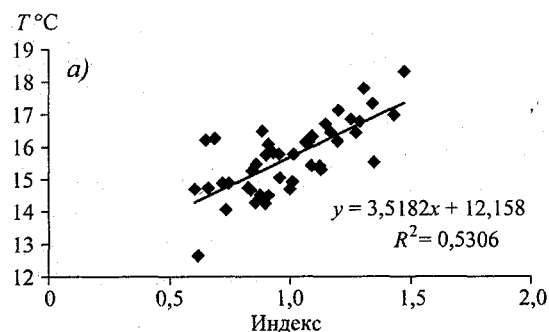


Рис. 5. Корреляция индексов ширины колец дуба и максимальной температуры с июня по сентябрь (метеостанция Южно-Курильск) (а) и измеренная (1) и реконструированная (2) по ширине колец дуба температура с июня по сентябрь (б).

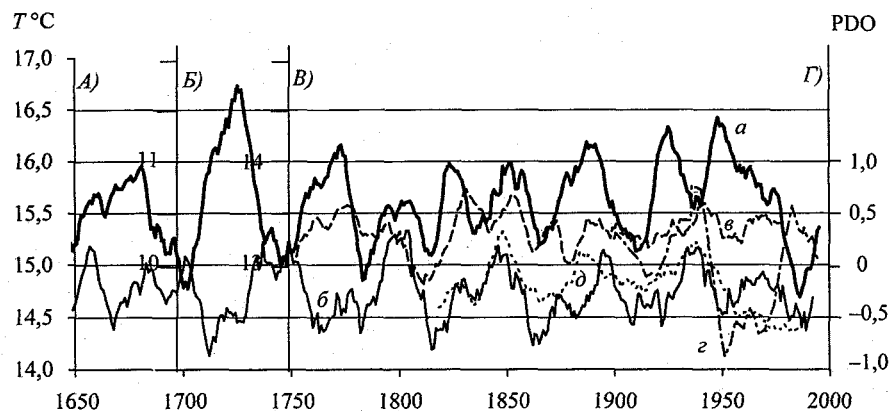
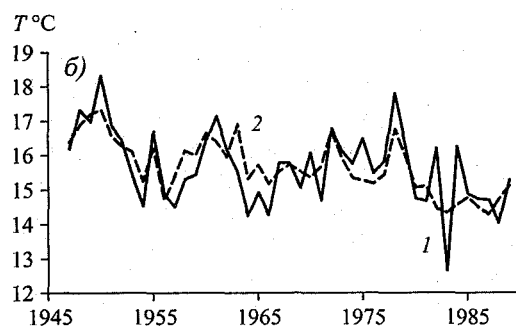


Рис. 6. 11-летние сглаженные средние температуры, реконструированные по дендрохронологическим данным.

A, a — Кунашир: температура июня—сентября по хронологии дуба „BRL”; *Б, б* — Камчатка: температура июня по хронологии лиственницы „Эссо”; *В, в* — прибрежные районы Аляски: температура апреля—сентября по сводной ширине и плотности хвойных (Wiles et al., 1996d). Для сравнения приведены также индексы тихоокеанской декадной осцилляции PDO (по Mantua et al., 1997) (*Г, г*) и хронология березы „Авача”, Камчатка, в условной шкале (*д*).

Хронологии годовых колец, температуры поверхности океана и тихоокеанская декадная осцилляция

Инструментальные метеорологические наблюдения и моделирование показывают, что климатические колебания в северной части Тихого океана пространственно скоррелированы. Эти колебания часто описываются как изменения температуры или давления у поверхности океана на территории севернее 30° с. ш., и выражаются в виде индексов тихоокеанской декадной осцилляции (Pacific Decadal Oscillation — PDO). Иногда этот показатель называют северотихоокеанским индексом (North Pacific Index — NPI) и выражают в виде среднемесячных аномалий давления для тихоокеанской области между 30 и 65° с. ш. (Trenberth, Hurrell, 1994). Мантуя с соавторами (Mantua et al., 1997) для характеристики PDO использует главную компоненту температуры поверхности Тихого океана для области севернее 20° с. ш.

Значения PDO положительны, когда в центре северной части Тихого океана отмечаются отрицательные аномалии давления. Максимальные значения PDO соответствуют похолоданиям, а минимальные — потеплениям. Инструментальные наблюдения (Mantua et al., 1997) показывают, что в XX в. (1900—1993 гг.) резкие изменения в ходе PDO произошли в 1976, 1946 и 1924 гг. Попытки использовать косвенные, в частности дендрохронологические, данные для продления этого ряда оказались успешными, причем реконструкции поддаются как летние, так и зимние значения PDO (D'Arrigo et al., 1999; Biondi et al., 2001).

Мы проверили связи полученных индексов прироста годовых колец с температурами поверхности моря (SST) (Kaplan et al., 1998) и тихоокеанской декадной осцилляцией (PDO) (Mantua et al., 1997). Пространственные корреляции температур поверхности моря с измеренной температурой на станции Южно-Курильск, с одной стороны, и индексами ширины годовых колец, с другой, оказались очень похожими. Наиболее высокие корреляции хронологии дуба с месячными PDO за период 1900—2000 гг. отмечаются для июля, августа и сентября (–0,52, –0,44 и –0,44 соответственно). Как было отмечено выше, отрицательная корреляция объясняется тем, что максимальные значения PDO соответствуют похолоданиям. Хронология дуба BRL хорошо отражает изменение PDO в 1940-е годы, а также в конце 1970-х и 1990-х годов. Из рис. 1 и 6 видно, что подобные изменения происходили неоднократно в течение последних 400 лет.

Спектральный анализ индексов прироста дуба и значений PDO показывает, что их спектры имеют явное сходство: 30—50-летние и 28-летние пики плотности в спектре годовых колец примерно соответствуют 33—50-летним пикам в спектре PDO. Это сходство дает основание предполагать, что выполненная реконструкция адекватно отражает долгопериодные изменения PDO в северной части Тихого океана за последние несколько столетий. В спектрах обеих серий значимыми являются также

пики 4—6-летней продолжительности, которые могут быть обязаны своим происхождением колебаниям Эль-Ниньо.

Хронологии лиственницы с Камчатки не обнаруживают явных связей с PDO, возможно, в связи с тем что они в большей степени, чем кунаширские хронологии, отражают климат внутренней части полуострова и в меньшей степени зависят от температуры поверхности океана. Однако на качественном уровне видно сходство 11-летних сглаженных средних значений PDO с июня по сентябрь и хронологии „Эссо” (см. рис. 6).

Выпадающие и светлые кольца и ассоциированный с ними климатический сигнал

Процедура перекрестного датирования позволяет выявлять выпадающие и ложные кольца и датировать их с точностью до года. В условиях верхней границы леса, где прирост древесины обусловлен главным образом температурой, выпадающие кольца обычно встречаются в экстремально холодные летние сезоны. Однако помимо климатического фактора, к выпадению колец могут привести и другие: пожары, вспышки численности насекомых и другие повреждения деревьев локального характера. Так, например, в хронологии „Толбачик” выпадающие кольца в 1976, 1977, 1978 гг. связаны с непосредственными повреждениями деревьев во время извержения этого вулкана в 1975 г.

Светлыми называются кольца, в которых присутствуют один или очень немного рядов клеток поздней древесины (Filion et al., 1986). Обычно это также свидетельствует о коротком и холодном вегетационном периоде. Предполагают (LaMarche, Hirschboeck, 1984; Filion et al., 1986; Yamaguchi et al., 1993), что такие резкие похолодания часто случаются после крупных вулканических извержений: по данным Filion et al. две трети обнаруженных ими светлых колец в Субарктике (Квебек) совпадают с годами крупных извержений. Однако так же как и выпадающие кольца, светлые могут образовываться и по неклиматическим причинам, например при повреждении хвои насекомыми.

Выпадающие кольца часто совпадают с минимумами на сводной кривой индексов ширины колец (1811, 1864, 1867, 1947 гг.). Это и понятно, поскольку они включаются в хронологию в виде нулевых значений прироста. Поэтому климатически обусловленными с уверенностью могут считаться те выпадающие кольца, которые повторяются в разных независимых локальных хронологиях. Мы сравнили хронологию ширины колец „Толбачик” (рис. 7) с датировками выпадающих и светлых колец, определенными по хронологиям „Эссо” и по хронологии, построенной для Кроноцкого полуострова (Furuta et al., 2002). Это сравнение показывает, что подавляющее большинство выпадающих и светлых колец совпадает с минимумами на этой независимой кривой, а датировки самих выпадающих колец для хронологий „Эссо” и „Кроноцкий” также согласуются между

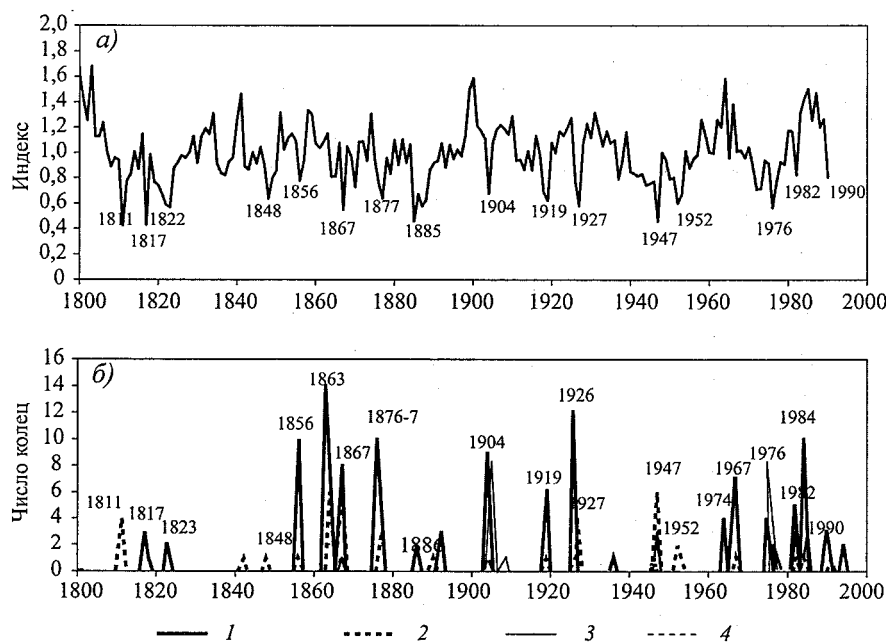


Рис. 7. Хронология (индексы ширины колец) „Толбачик” (а) и число светлых и выпадающих колец в хронологиях (б).

1 — Эссо (светлые), 2 — Эссо (выпадающие), 3 — КТЛ, в районе Эссо (Шиятов, TRDB) (выпадающие), 4 — на Кроноцком полуострове (выпадающие) (Furuta et al., 2002).

собой. Таким образом, с большой вероятностью, климатически обусловленными можно считать выпадающие и светлые кольца 1811, 1817, 1856, 1867, 1877, 1904—1905, 1919, 1926—1927, 1947, 1952, 1975—1976, 1982 гг.

Поскольку появление светлых и выпадающих колец в целом вызывается сходными причинами, логично предположить, что они должны быть синхронными, однако это не совсем так. Совпадение светлых и выпадающих колец наблюдается в семи случаях; в семи — формирование светлого кольца предшествует появлению выпадающего на один год (например, в 1863 и 1864 гг., 1876 и 1877 гг., 1904 и 1905 гг., 1926 и 1927 гг.) (табл. 2). Выпадение кольца в последнем случае, возможно, свидетельствует о реакции дерева на неблагоприятные условия предыдущего лета, „обозначенного” светлым кольцом. В десяти случаях светлые и выпадающие кольца не ассоциируются друг с другом. В одном случае (1892 г.) выпадающее кольцо предшествует светлому.

На рис. 8 показано распределение среднемесячных температур на станциях Эссо и Петропавловск за весь период наблюдений за распределением среднемесячных температур в годы образования наиболее характер-

Таблица 2

**Светлые и выпадающие кольца в древесно-кольцевых хронологиях
Камчатки и субарктической зоны Северной Америки (Квебек)**

Светлые кольца, Эссо	Выпадающие кольца, Эссо	Выпадающие кольца, Кроноцкий	Выпадающие кольца, Эссо (KEL) (Шиятов, ITRDB)	Светлые кольца, Квебек (Filion et al., 1986)
1994				
1991	1990			
1984	1984	1984, 1985		
1982	1982	1982		
1975		1976		
1967	1967			1967
1964				1963
1947	1947	1947	1947	1947
1927	1926		1926, 1927	
1919	1919			1918
1904	1905	1905		1904
1892				
1886				
1876	1877	1877	1877	1878
1867	1867	1867		1868
1863	1864			1863
1856	1856	1856	1857	
1823				1822
1817				1816, 1817

ных светлых или выпадающих колец. Данные по метеостанции Петропавловск привлечены из-за короткого и неполного ряда наблюдений на метеостанции Эссо. Этот рисунок показывает, что далеко не всегда образование выпадающих и светлых колец можно объяснить холодными летними условиями текущего года. Так, в 1904—1905 гг., когда образовалось несколько светлых и выпадающих колец в обеих хронологиях, никаких температурных аномалий весной—летом не обнаружилось. Зато в 1903 г. май, июнь и июль были очень холодными. В 1947 и 1982 гг. температура июня, от которой в значительной степени зависит формирование кольца, действительно была ниже средней многолетней. В 1926 и 1919 гг. был холодным май, что также обычно негативно сказывается на приросте древесины. С другой стороны, в 1984 г., когда образовалось 10 светлых колец, никаких температурных аномалий в летний сезон не обнаружено, напротив, температура мая и июня была существенно выше нормы. Таким образом,

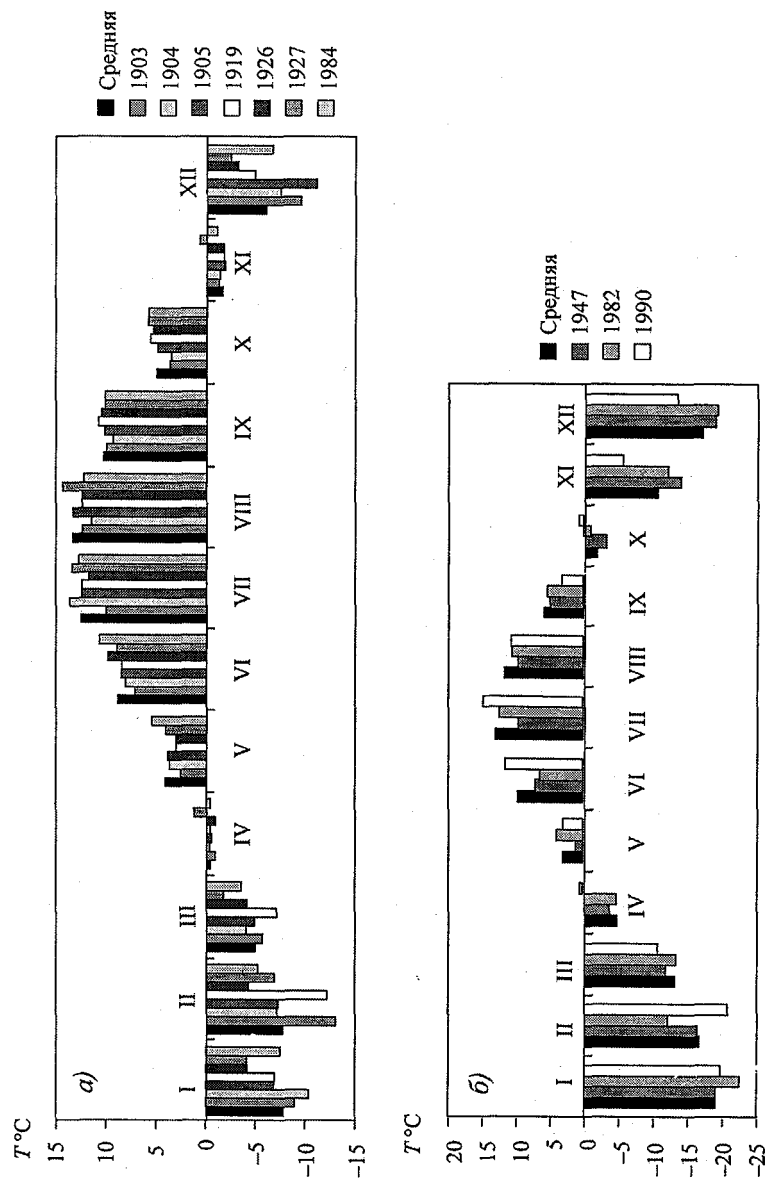


Рис. 8. Распределение среднемесячных температур на метеостанции Петропавловск-Камчатский в 1903, 1904, 1905, 1919, 1926, 1927, 1984 гг. по сравнению со средним за 1890—1996 гг. (а) и на метеостанции Эссо в 1947, 1982, 1990 гг. по сравнению со средним за 1941—1995 гг. (с пропусками) (б).

хотя в общем случае образование светлого или выпадающего кольца означает аномально холодное и/или короткое лето (текущего или предшествующего года), эта связь неоднозначна.

Обсуждение

Наши результаты о преимущественном влиянии июньских температур на прирост лиственницы и июльских — на прирост березы согласуются с полученными ранее. Так, большинство исследователей отмечало положительную связь ширины колец лиственницы на Камчатке с температурой мая и июня (Gostev et al., 1996; Solomina et al., 1999; Solomina et al., 2000; Furuta et al., 2002). Связи с осадками обычно статистически незначимы, хотя одна хронология, построенная для долины реки Камчатки (70 м над ур. м.), обнаружила положительную связь с осадками вегетационного периода предшествующего года (Takahashi et al., 2001). По данным Гостева с соавторами (Gostev et al., 1996), ширина колец березы на Камчатке коррелирует с температурой июля—августа. Сравнение сглаженных по 11 годам кривых хронологий березы и лиственницы (см. рис. 6) показывает их несомненное сходство, что свидетельствует об общем климатическом сигнале, отражаемом обеими кривыми.

С другой стороны, ход индексов прироста этих двух камчатских хронологий отличается от хронологии дубов с Кунашира: максимумы и минимумы на кривых совпадают по времени крайне редко, т. е. межгодовая изменчивость летних температур на Кунашире и Камчатке за последние 380 лет различна. Это не является неожиданностью, так как и по инструментальным наблюдениям известно, что климат в этих районах существенно различается. Однако если обратить внимание на сглаженные кривые (на рис. 6 по 11 годам), то можно обнаружить, что в период примерно с 1750-х по 1850-е годы кривые имеют в целом синхронный ход, а с 1910-х годов обнаруживают тенденцию к противофазному ходу. Возможно, это связано с изменением характера циркуляции в северной части Тихоокеанского региона в связи с окончанием малого ледникового периода.

Многочисленные реконструкции летних температур были выполнены для Аляски западного сектора Северотихоокеанского региона (Jacoby, Cook, 1981) (Barclay et al., 1999) (Wiles et al., 1999a, b). Сопоставление наших реконструкций с кривой температуры с апреля по сентябрь для Аляски (Wiles et al., 1996) показывает, что при сглаживании кривых (например, по 11 лет, как показано на рис. 6) обнаруживается явное совпадение трендов изменчивости летней температуры на Камчатке и Аляске. Датировка морен ледников Камчатки и Аляски (Solomina, Calkin, 2003) также свидетельствует о синхронности колебаний климата декадной продолжительности на протяжении последних 4—5 столетий на Камчатке и Аляске. Вопрос о причинах образования светлых и выпадающих колец в

камчатской хронологии остается во многом открытым. Предположение о том, что светлые кольца отражают общепланетарные похолодания, связанные с крупными эксплозивными извержениями, в случае с камчатской хронологией не оправдывается. Так, не обнаружено ни одного (!) совпадения светлых и выпадающих колец с морозобойными кольцами, выделенными в работе (LaMarche, Hirschboeck, 1984), которые, как считается, совпадают с годами крупных извержений. Светлые кольца на Камчатке в 1817, 1863, 1904, 1947, 1967 гг. совпадают со светлыми кольцами в Квебеке (см. табл. 2). Однако это всего пять совпадений из 53 случаев светлых колец, зарегистрированных в работе (Filion et al., 1995) за XVIII—XX вв. Если соотносить светлые кольца на Камчатке с известными климатически эффективными извержениями, то приходится предполагать запаздывание реакции деревьев на похолодание в 1—2 года (например, светлые кольца 1817, 1886, 1904, 1963 гг. можно соотнести, соответственно с извержением Тамборы в 1815 г., Кракатау в 1883, Санта-Мария, Пеле и Сутьер в 1902 г. и Агунг в 1963 г.) (Zielinski et al, 1994). Интересно, что катастрофические климатически эффективные извержения вулканов самой Камчатки и ближайшей Аляски (Шивелуч 1965 и 1854 гг., Безымянный 1956 г., Катмай 1912 г.) никакого видимого влияния на прирост деревьев на Камчатке не оказали.

Существует вероятность того, что выделенные нами светлые кольца имеют неклиматическую природу. Различия между светлыми кольцами, обусловленными климатическими и биологическими (повреждения насекомыми) факторами, рассматривались в работах (Filion et al., 1986, 1995). Эти исследования, в частности, показывают, что климатически обусловленные светлые кольца встречаются на большей территории и отличаются от биологически обусловленных процентом поздней древесины. Кроме того, восстановление „нормальной” ширины колец после повреждения хвои вредителями занимает несколько лет, в то время как после резкого похолодания уже через год-два ширина колец может вернуться к средней многолетней. В хронологии „Эссо” большинство светлых колец ассоциированы с выпадающими, причем это совпадение прослеживается и при сравнении с независимой и расположенной на расстоянии более 100 км хронологии „Кроноцкий”. Эти кольца совпадают с узкими в хронологии „Толбачик”, которая также удалена от „Эссо” на несколько десятков километров и находится на другом берегу реки Камчатки. Возвращение к средним значениям прироста после этих узких колец в подавляющем большинстве случаев происходит за 1—2 года. Все это свидетельствует, скорее, о климатической природе большинства светлых колец и означает резкое летнее похолодание. С большой вероятностью климатически обусловленными мы считаем 1984, 1947, 1904—1905, 1876—1877, 1867, 1856 гг., когда светлые кольца в хронологии „Эссо” ассоциированы с выпадающими в хронологии Кроноцкого полуострова (Furuta et al., 2002).

Выводы

1. Рекогносцировочные исследования на Кунашире показали, что здесь имеется несколько древесных пород, пригодных для дендрохронологических целей. Построена предварительная хронология для тиса продолжительностью 200 лет и для дуба длиной 400 лет. Обе хронологии положительно коррелируют с максимальными температурами июня—сентября, но теснота связей с климатическими параметрами выше у хронологии дуба.

2. Хронологии лиственницы в центральной части Камчатки вблизи верхней границы леса положительно коррелируют со средними температурами июня; предварительная хронология березы из предгорий Авачи коррелирует с температурой июля. Сглаженные по 11 годам хронологии лиственницы и березы из этого региона обнаруживают явное сходство, что подтверждает климатическую природу декадных колебаний индексов прироста обеих древесных пород.

3. Сходство колебаний ширины колец дуба (о. Кунашир) с индексом тихоокеанской декадной осцилляции (поля пространственной корреляции, спектральные свойства, парная корреляция) свидетельствует о том, что дендрохронологические данные могут быть использованы для реконструкции рядов PDO (за июнь—сентябрь) за четыре столетия.

4. Декадная изменчивость ширины колец на Камчатке и Аляске в XVII—XX вв. очень сходна. Это свидетельствует о единстве циркуляционных процессов во всем Северотихоокеанском регионе. Кривая ширины колец дуба с о. Кунашир согласуется с ними в период 1750—1850 гг., а затем это сходство исчезает, что может свидетельствовать об изменившемся характере атмосферной циркуляции.

5. Большинство светлых колец (хронология „Эссо”) совпадают с выпадающими (хронологии „Эссо”, „Толбачик”, „Кроноцкий”) или предшествуют им на один год. Светлые и выпадающие кольца также могут иметь климатическую природу и указывать на резкие похолодания летом (или укороченный вегетационный период), которые, возможно, связаны с крупными вулканическими извержениями. Светлые кольца в хронологии „Эссо” 1817, 1886, 1904, 1963 гг. можно соотнести соответственно с извержением Тамборы в 1815 г., Кракатау в 1883 г., Санта-Мария, Пеле и Сутер в 1902 г. и Агунг в 1963 г., однако это совпадение может быть и случайным.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке NSF (грант № ATM 02-02898, ATM 02-11583) и ICTS (грант № 2947). Мы также выражаем признательность сотрудникам заповедника Курильский за помощь в полевых работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баркалов В., Еременко Н. А. 2003. Флора природного заповедника „Курильский” и заказника „Малые Курилы” (Сахалинская область). — Дальнаука, Владивосток. — 285 с.
- Савченко А. Г. 1994. Метод закупоривания полостей древесных стволов. Патент № 2019084. — Российское Федеральное Агентство. Москва.
- Barclay D. J., Wiles G. C., Calkin P. E. 1999. A 1119-year tree-ring-width chronology from western Prince William Sound, southern Alaska. — *Holocene*, v. 9, p. 79—84.
- Biondi F., Gershunov A., Cayan D. 2001. North Pacific decadal climate variability since AD 1661. — *J. Clim.*, v. 14, p. 5—10.
- Cook E. R., Kairiukstic L. A. 1990. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. — Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland, 394 pp.
- D'Arrigo R., Wiles G., Jacoby G., Villalba R. 1999. North Pacific sea surfaces temperatures: past variations inferred from tree rings. — *Geophysical Research Letters*, v. 26(17), p. 2757—2760.
- Filion L., Cournoyer L. 1995. Variation in wood structure of eastern larch defoliated by the larch sawfly in subarctic Quebec, Canada. — *Can. J. Forest Res.*, v. 25, p. 1263—1268.
- Filion L., Payette S., Gauthier L., Boutin Y. 1986. Light rings in subarctic conifers as a dendrochronological tool. — *Quaternary Research*, v. 26, p. 272—279.
- Furuta F., Sano M., Sweda T. 2002. Summer temperature trend over the past 400 years for Central Kamchatka reconstructed from tree rings. In: M. Yamano, T. Nagao, T. Sweda (Ed.). *Geothermal/Dendrochronological paleoclimate reconstruction across eastern margin of Eurasia*. — Matsuyama, Japan, p. 92—99.
- Gostev M., Wiles G., D'Arrigo R., Jacoby G., Khomentovsky P. 1996. Early summer temperature since 1670 A.D. for Central Kamchatka reconstructed based on a Siberian larch tree-ring width chronology. — *Can. J. For. Res.*, v. 6, p. 2048—2052.
- Holmes R. 1994. *Dendrochronology program library — users manual*. — Tucson, Arizona.
- Jacoby G. C., Cook E. R. 1981. Past temperature variations inferred from a 400-year tree-ring chronology from Yukon territory, Canada. — *Arct. and Alp. Res.*, v. 13(4), p. 409—418.
- Jacoby G. C., Solomina O., Frank D., Eremenko N., D'Arrigo R. Kunashir (Kuriles) oak 400-year reconstruction of temperature and relation to the Pacific Decadal Oscillation. — *Paleo, Paleo, Paleo*, in press.
- Kaplan A., Cane M., Kushnir Y., Clement A., Blumenthal B., Rajagopalan B. 1998. Analysis of global sea surface temperature 1856—1991. — *J. Geophys. Res.*, v. 103, p. 18567—18589.
- LaMarche V. C., Hirschboeck K. K. 1984. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. — *Nature*, v. 307, p. 121—128.
- Mantua N. J. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. — *Bull. Amer. Met. Soc.*, v. 78, p. 1069—1080.
- Solomina O., Calkin P. 2003. Lichenometry as applied to moraines in Alaska, USA, and Kamchatka, Russia. — *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, v. 35(2), p. 129—143.
- Solomina O. N., Muraviev Ya. D., Braeuning A., Kravchenko G. N. 1999. Two new ring width chronologies of larch and birch from the Kamchatka peninsula (Russia) and their relationship to climate and volcanic activities. Kamchatka. — In: R. Naruse (Ed.). *Cryospheric studies in Kamchatka v. II*, Hokkaido, p. 111—124.
- Solomina O. N., Muraviev Ya. D., Braeuning A., Shiraiwa T., Shiyatov S. G. 2000. Tree-rings in Central Kamchatka in comparison with climate variations and ice core data. — In: T. Mikami (Ed.). *Proceedings of the International Conference on Climate Change and Variability*, Tokyo, Japan, p. 133—137.

Takahashi K., Homma K., Shiraiwa T., Vetrova V., Hara T. 2001. Climatic factors affecting the growth of *Larix cajanderi* in the Kamchatka Peninsula, Russia. — Eurasian J. Forest Res., v. 3, p. 1—9.

Trenberth K. E., Hurrell J. W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. — Climate dynamics, v. 9, p. 303—319.

Wiles G. C., Barcklay D. J., Calkin P. E. 1999. Tree-ring dated Little Ice Age histories of maritime glaciers from western Prince William Sound, Alaska. — The Holocene, v. 9, p. 163—174.

Wiles G. C., D'Arrigo R. D., Jacoby G. C. 1996. Temperature changes along the Gulf of Alaska and the Pacific Northwest coast modeled from coastal tree-rings. — Can. J. For. Res., v. 26, p. 474—481.

Wiles G. C., Post A., Muller E. H., Molnia B. F. 1999b. Dendrochronology and Late Holocene history of Bering Piedmont glacier, Alaska. — Quaternary Research, v. 52, p. 185—195.

Yamaguchi D., Filion L., Savage M. 1993. Relationship of temperature and light ring formation at subarctic treeline and implications for climate reconstruction. — Quaternary Research, v. 39, p. 256—262.

Zielinski G. A., Mayewski P. A., Meeker L. D. et al. 1994. Record of volcanism since 7000 BC from the GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system. — Science, v. 264, p. 948—951.

ОТКЛИК ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ХРОНОЛОГИЙ СЕВЕРА ЕВРАЗИИ НА МОЩНЫЕ ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

О. В. Сидорова^{}, М. М. Наурзбаев, Е. А. Ваганов*

^{*} РФ, 660036 Красноярск, Академгородок, Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН,
ovsidorova@forest.akadem.ru

Реферат. Проанализирован отклик радиального прироста деревьев севера Евразии на мощные вулканические извержения за 2000 лет. Проведен сравнительный анализ долговременных древесно-кольцевых хронологий и других косвенных источников информации, включающих исторические данные и данные по содержанию сульфатов в слоях ледовой колонки Гренландии (GISP2). Это позволило обнаружить общий отклик на мощные вулканические извержения в изменении температуры в исследуемой области северного полушария. Показано, что в погодичной изменчивости прироста деревьев, произрастающих на севере Евразии, достоверно зафиксирована информация об изменениях температуры воздуха, вызванных вулканической деятельностью. Установлено, что крупные вулканические извержения в северном полушарии (с индексом вулканической активности ≥ 4) обуславливают снижение температуры и ведут к депрессии роста древесных растений на севере Евразии в течение последующих четырех лет после вулканических извержений. Для южного полушария данной связи не установлено, однако отдельные вулканические извержения, характеризующиеся наибольшим индексом вулканической активности, оказывают влияние на радиальный прирост деревьев севера Евразии.

Проведено разбиение дат вулканических извержений за последнее тысячелетие на три класса в широтном направлении. Установлено, что больше всего вулканических извержений в северном полушарии зафиксировано в высоких широтах, а в южном полушарии — в низких. Наибольшие депрессии прироста деревьев на севере Евразии отмечены в широтной зоне, прилегающей к экватору северного полушария.

Установлено, что мощные вулканические извержения являются причиной синхронного снижения радиального прироста деревьев в некоторые (536/537/538, 627/628, 854/855, 1259, 1641/1642, 1783/1784, 1812/1813, 1815/1816, 1883, 1912) годы на всей исследуемой территории севера Евразии.

Ключевые слова. Радиальный прирост деревьев, изменения температуры, вулканические извержения, север Евразии.

RESPONSE OF TREE-RING CHRONOLOGIES FROM SUBARCTIC EURASIA TO THE STRONG VOLCANIC ERUPTIONS

O. V. Sidorova, M. M. Naurzbaev, E. A. Vaganov*

* V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, Akademgorodok, 660036 Krasnoyarsk, Russia,
ovsidorova@forest.akadem.ru

Abstract. A response of tree radial growth to powerful volcanic eruptions was analyzed for the last 2000 years. The comparative analysis of long-term tree-ring chronologies constructed for the Eurasian regions and some other proxy-data on natural variations of climate (including historical data and sulphate content in GISP2 — Greenland ice core) was made. The analysis allowed to find a common response in changes of temperature in the investigated part of the Northern Hemisphere to the strong volcanic eruptions. It was shown that inter-annual variability of tree growth rate in Northern Eurasia reflects the information on global anomalies in climate caused by volcanic activity. It was found that strong volcanic eruptions ($VEI \geq 4$) in the Northern Hemisphere led to temperature decrease and caused radial growth depression in the North of Eurasia during 4 years after the event. This was not found in relation to the Southern Hemisphere. However, some volcanic eruptions having the highest index of volcanic activity affect tree radial growth in northern Eurasia.

The dates of volcanic eruptions of the last millennium were subdivided into three latitudinal classes. It was shown that most of volcanic eruptions occurred in high latitudes of the Northern Hemisphere, while the lesser part in the low latitudes in the Southern Hemisphere. The majority of depressions in tree ring chronologies from northern Eurasia caused by volcanic eruptions in the Northern Hemisphere are associated with the middle and high latitudes. Volcanic eruptions cause synchronous depressions of tree growth for several years (536/537/538, 627/628, 854/855, 1259, 1641/1642, 1783/1784, 1812/1813, 1815/1816, 1883, 1912 AD) over huge area of the northern Eurasia.

Keywords. Tree radial growth, depression, temperature variability, Northern Eurasia.

Введение

Известно, что результатом мощного вулканического извержения является выброс в атмосферу частиц пыли и аэрозолей, что уменьшает ее прозрачность и вследствие этого приводит к ослаблению солнечной радиации, достигающей земной поверхности. Это может привести к кратковременному или длительному нарушению теплового баланса и похолоданию (Логинов, 1984; Zielinski, 1994, 2000). Датировкой катастрофических со-

бытий с помощью древесно-кольцевого анализа занимались многие исследователи, однако масштабы проведенных работ явно недостаточны (Lough, Fritts, 1987; Zielinski, 1994; Shiyatov et al., 1996; Briffa et al., 1998; Krakauer, Randerson, 2003). Неоднократны попытки сопоставить данные о значительных изменениях температуры с датами мощных вулканических извержений. Однако такие попытки ограничивались длительностью рядов наблюдений за температурой и приближенной исторической информацией, когда для такого ряда сопоставления необходима разрешающая способность во времени до года (Ваганов и др., 1996; Cole-Dai et al., 2000).

Особый интерес представляет интегральная оценка информации о прошлых природно-климатических вариациях, включая вулканическую активность, зафиксированную в календарно датированных изменениях прироста годовых колец деревьев.

Методы и материалы

Материалом для исследования послужили длительные древесно-кольцевые хронологии, полученные для севера Евразии: для востока Таймыра (72° с. ш., 102° в. д.) (Naurzbaev et al., 2002; Наурзбаев и др., 2003), северо-востока Якутии (70° с. ш., 148° в. д.) (Hughes et al., 1999; Сидорова, Наурзбаев, 2002), полуострова Ямал (67° с. ш., 70° в. д.) (Хантемиров, 1999; Nantemirov, Shiyatov, 2002) и Швеции (68° с. ш., 20° в. д.) (Zetterberg et al., 1995; Grudd et al., 2002) (рис. 1). Ранее при анализе пространственно-временной корреляции локальных хронологий субарктики Урала и Сибири было четко показано, что хронологии значимо коррелируют между собой на расстоянии до 600—800 км (Ваганов и др., 1996), поэтому региональные тысячелетние хронологии представляют длительные ряды изменчивости прироста деревьев (и изменчивости климатических переменных) для крупных секторов субарктической зоны северного полушария. Для субарктической области была выявлена тесная связь изменчивости ширины годовых колец с летней (июнь—июль) температурой воздуха (Ваганов и др., 1996; Ваганов и др., 2000; Сидорова, Наурзбаев, 2002). На основании значимых статистических характеристик: стандартного отклонения (0,73—1,52), чувствительности (0,74—0,80), корреляции в длительных колебаниях (0,17—0,35) — все четыре исследуемые хронологии в дальнейшем были объединены в одну генерализированную хронологию по северу Евразии (Наурзбаев и др., 2003).

Длительные древесно-кольцевые хронологии дали возможность соотнести годы исторически датированных, а также восстановленных по высокой концентрации сульфатов в слоях ледовых колонок Гренландии (GISP2) (Zielinski, 1994; Briffa et al., 1998) дат значительных вулканических извержений с изменчивостью радиального прироста. Представляло интерес выявить общий отклик в изменении температуры исследуемой об-

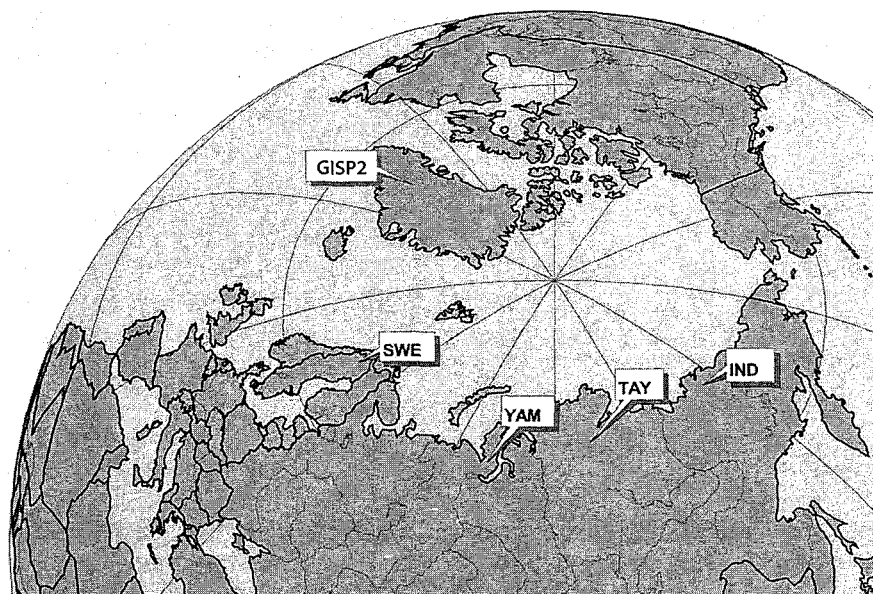


Рис. 1. Местоположение длительных древесно-кольцевых хронологий по северу Евразии и длительной хронологии по ледовой колонке Гренландии (GISP2).

ласти северного полушария на значительные вулканические извержения как документально зафиксированные, так и имеющие даты, определенные по содержащимся в ледовых кернах слоям сульфатов.

Данные исторических сведений об извержениях вулканов и данные по содержанию сульфатов в слоях ледовых колонок (Bradley et al., 1992; Zielinski et al., 1994; Briffa et al., 1998a) сопоставлены с полученными нами древесно-кольцевыми хронологиями. Были отобраны даты наиболее мощных вулканических извержений по индексу вулканической активности ($VEI \geq 4$).

С помощью метода „наложенных эпох” (синхронное детектирование) (Измайлов и др., 1999) в длительных древесно-кольцевых хронологиях были отобраны даты мощных вулканических извержений с периодом 10 лет до и после события. Данный метод позволил анализируемый временной интервал разбить на равные участки заданной длительности и произвести усреднение результатов, одинаково расположенных во времени относительно начал этих участков с „накоплением” эффекта за 1000 лет. Наиболее выраженные периоды депрессии радиального прироста совпадали как с документально зафиксированными, так и с неизвестными вулканическими извержениями (Zielinski et al., 1994, 2000; Briffa et al., 1998a).

Результаты и обсуждение

Рассмотрим данные по извержению вулканов в сопоставлении с длительными древесно-кольцевыми хронологиями.

Согласно историческим свидетельствам, 536—537 гг. в Европе, Средиземноморье и Среднем Востоке сопровождались холодным летом с мощным густым туманом, низким урожаем, голодом, эпидемиями и гибелью растительных и животных популяций (Stothers, 1999; Baillie, 1999). В ранее опубликованных работах высказывались предположения о том, что подобные условия могли быть вызваны главным образом вулканическими явлениями (Briffa et al., 1992; Lara and Villalba, 1993; Stothers, 1999; D'Arrigo et al., 1999). Имеется также альтернативная гипотеза о космическом феномене (астероиде или комете), что могло бы объяснить странные климатические условия и другие сопровождающие эффекты в то время (Baillie, 1999; Rigby et al., 2004).

На рис. 2 показан образец лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.) из низовьев р. Индигирки, где 536 г. характеризуется формированием достаточно узкого годичного кольца. Ряд последующих лет также характеризуется узкими кольцами, что свидетельствует о чрезвычайно неблагоприятных условиях в этот и последующие годы.

На рис. 3 приведен фрагмент двух хронологий по Таймыру и Индигирке в сопоставлении с концентрацией вулканического аэрозоля по данным ледовых кернов в предполагаемый период мощного вулканического из-

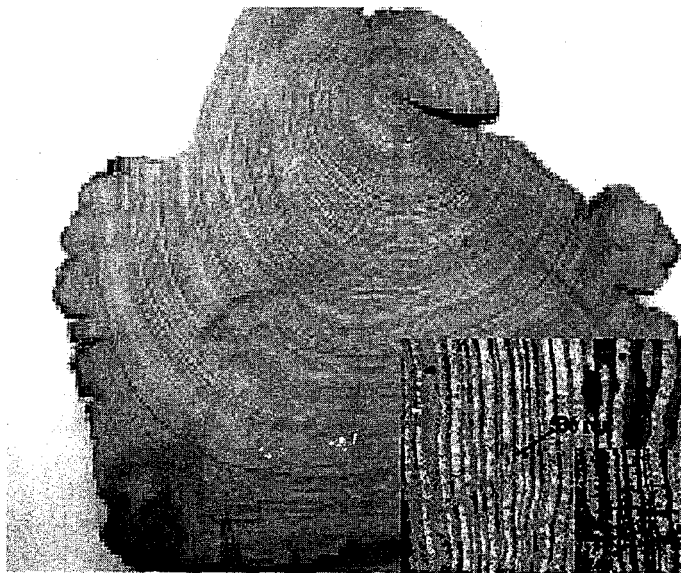


Рис. 2. Образец (IND 301) лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.), найденный в районе низовьев р. Индигирки.

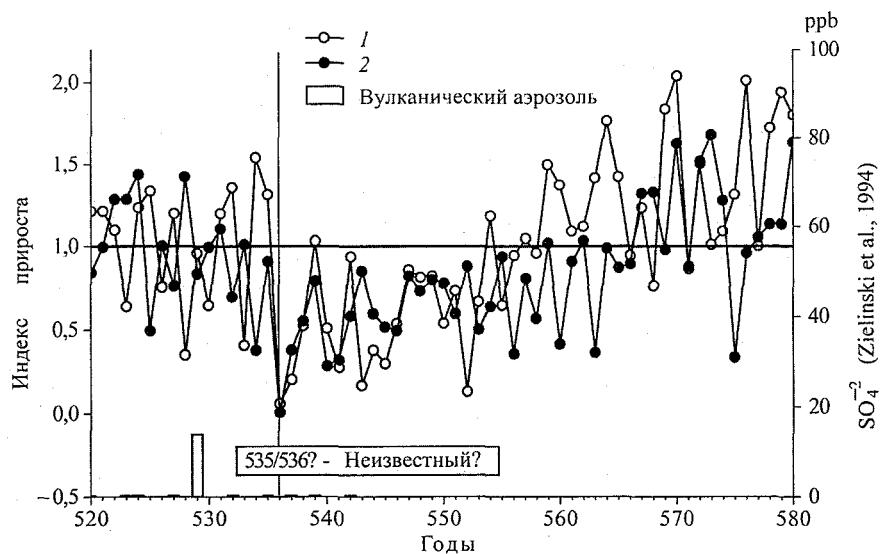


Рис. 3. Депрессия прироста деревьев для Таймыра (1) и Индигирки (2) после 536 г.

вержения. В слое ледяного ядра увеличение содержания сульфатов выявлено в 529 г., а в древесно-кольцевых хронологиях по Таймыру и Индигирке зафиксировано с запаздыванием в 536 г. График свидетельствует о сохранении величин прироста ниже текущего уровня в течение 20 лет, причем лишь в 559 г. кривая радиального прироста выходит на положительный уровень.

Установлено, что в хронологиях для субарктических областей депрессия радиального прироста ярко выражена в течение 23 лет, а не 10, как для европейских районов (Stothers, 1999, 2000; Baillie, 1999). Похолодание продолжительностью 23 года может быть обусловлено как падением кометы или астероида (Rigby et al., 2004), так и мощным извержением вулкана, которое нашло отклик в обоих полушариях. Для многих исследователей данный вопрос остается дискуссионным.

Из исторических свидетельств также известно, что в Европе февраль и июнь 1258 г. были достаточно холодными, а в России 1259 г. сопровождался необыкновенно холодным апрелем. В этот год высокое содержание сульфатов зафиксировано в слоях ледовых колонок (Zielinski, 1995). Для хронологии по Фенноскандии выявлены необычные периоды похолодания с 1250 по 1260 г. (Zetterberg et al., 1995). Полученные хронологии по Индигирке и Таймыру также показывают депрессию радиального прироста (рис. 4).

Из косвенных источников известно, что начало 1600 г. сопровождалось холодным летом — так называемый год без лета (Briffa et al., 1998; Zielinski, 2000). После извержения вулкана Уйянапутина в 1600 г. в слоях

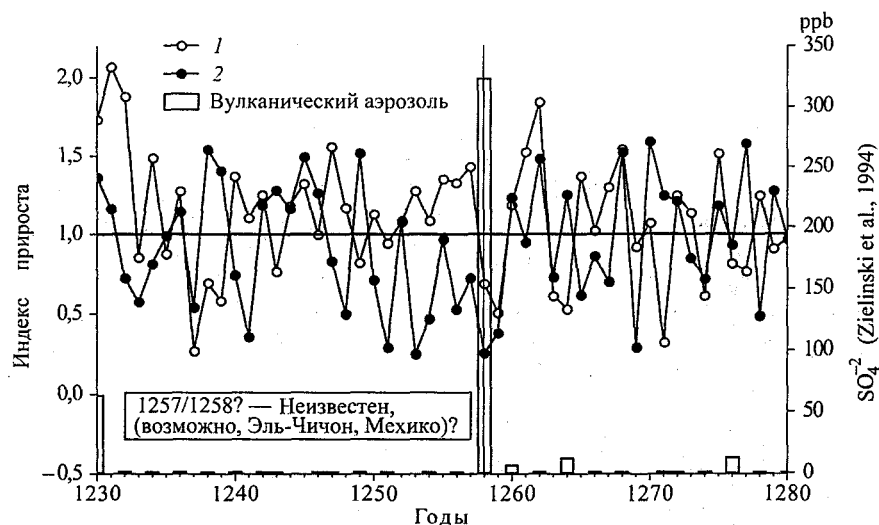


Рис. 4. Депрессия прироста деревьев для Таймыра (1) и Индигирки (2) в 1258 г. и последующие годы.

ледовых кернов найдено большое содержание микрочастиц вулканического стекла и серы (Thompson et al., 1989). Так, в Скандинавии 1601 г. характеризуют как год лунного затмения при красном солнце и луне (De Silva et al., 1998). Все это свидетельствует о большом возмущении атмосферы. В России 1600—1603 гг. также были достаточно холодными. Из исторических источников известно, что в Москве в эти годы выпадал снег и в июле, и в августе. Ряд холодных лет, следовавший один за другим, привел к гибели урожая и, следовательно, к голоду и увеличению смертности людей и животных. На рис. 5 приведены данные о депрессии прироста деревьев в период мощных вулканических извержений (1600 и 1641 гг.). Древесно-кольцевые хронологии отчетливо свидетельствуют о периодах депрессии продолжительностью до 7 лет.

В 1641 г. произошло мощное вулканическое извержение вулкана Паркер. В хронологиях для субарктической зоны Сибири это событие отразилось только на следующий год (см. рис. 5). По двум хронологиям восстановление прироста произошло только через шесть лет.

Не менее интересно событие, произошедшее в 1815 г. Из исторических источников известно, что извержение вулкана Тамбора в 1815 г. в южном полушарии ($VEI = 7$) привело к так называемому году без лета, точно такому же периоду, как в 1600 и 1641 гг. (Stothers, 1984). Как видно из рис. 6, событие в южном полушарии нашло отклик у деревьев, произрастающих в высоких широтах северного полушария. Отчетливо прослеживается тенденция спада прироста, распространяющаяся на ряд последующих лет. На положительный уровень кривые выходят только после 1830 г.

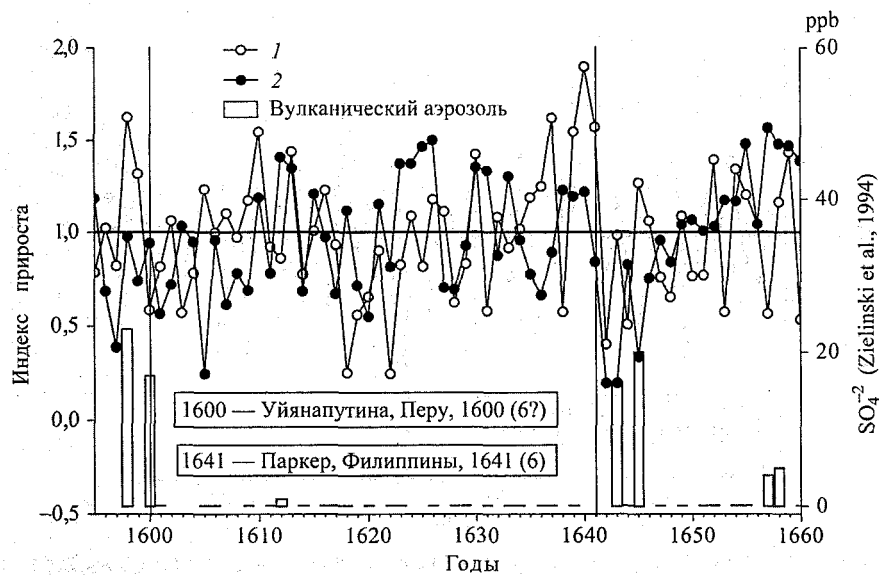


Рис. 5. Депрессия прироста деревьев для Таймыра (1) и Индигирки (2) в периоды около 1600 и 1641 гг.

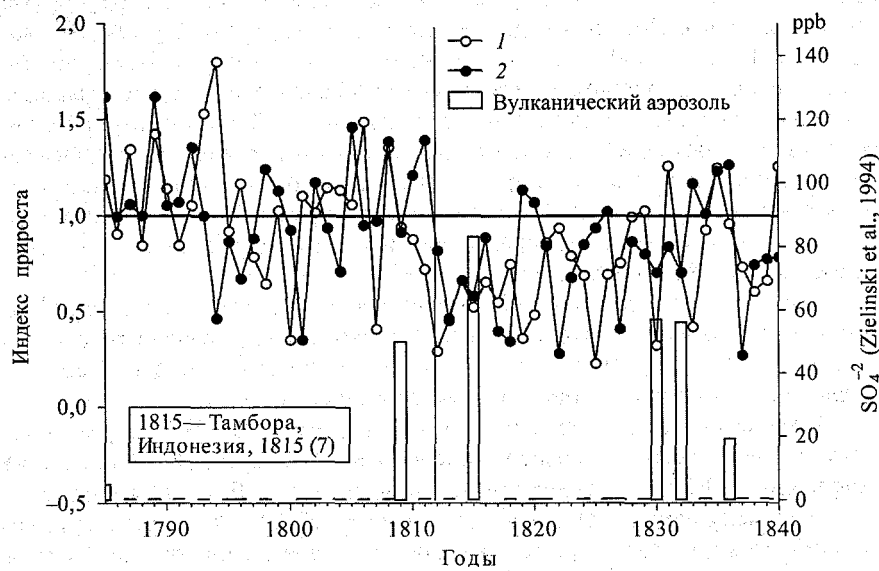
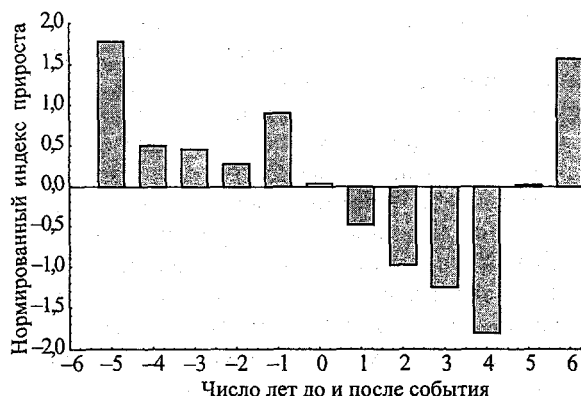


Рис. 6. Депрессия прироста деревьев для Таймыра (1) и Индигирки (2) в 1815 г. и последующие годы.

Рис. 7. Кривая реакции прироста деревьев на севере Евразии (Швеция, Ямал, Таймыр, Индигирка) на вулканические извержения северного полушария за последнее тысячелетие.



Для рассмотренной суммарной реакции деревьев, произрастающих на севере

Евразии, на мощные вулканические извержения ($VEI \geq 4$) в северном полушарии к полученным нами древесно-кольцевым хронологиям по Таймыру и Индигирке были добавлены хронологии по Швеции (Grudd et al., 2002) и Ямалу (Хантемиров, 1999; Hantemirov, Shiyatov, 2002). За последнее тысячелетие было рассмотрено 100 событий ($N = 100$) наиболее мощных вулканических извержений в северном полушарии. В результате объединения данных получена суммарная кривая ответной реакции прироста деревьев для четырех хронологий на вулканические извержения (рис. 7). Из графика видно, как существенно подавляется радиальный прирост деревьев после извержений. На положительный уровень интегральные кривые выходят только после пяти лет (Сидорова, Наурзбаев, 2000).

Данный график был сравнен с графиком, полученным Зелинским (рис. 8), изменения приземной температуры воздуха в северном полушарии на мощные вулканические извержения (Zielinski, 2000). Автор выделил четыре года до события и четыре после. За последние два столетия автор выбрал годы наибольшей вулканической активности (1815, 1835, 1875, 1883, 1902, 1947, 1956, 1963). Из обоих независимо построенных

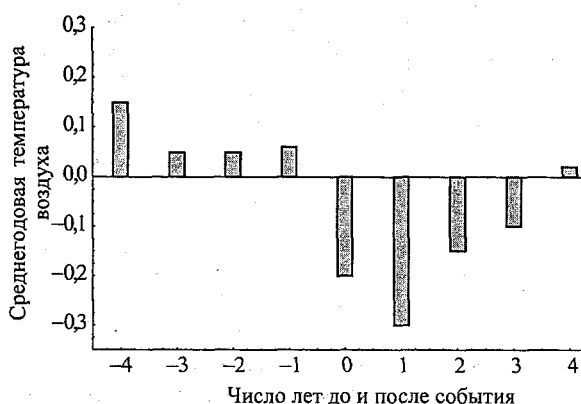


Рис. 8. Изменение приземной температуры воздуха в северном полушарии за последние 200 лет (Zielinski, 2000).

графиков (рис. 7 и 8) можно заметить, что в год извержения вулкана (рис. 8) среднегодовая температура воздуха, осредненная для северного полушария, резко понижается и выходит на положительный уровень через четыре года. Резкое изменение радиального прироста деревьев на севере Евразии (см. рис. 7) происходит только на следующий год после события и продолжается практически пять лет.

Таким образом, после извержения вулканов отмечается сходная качественная реакция температуры и динамики радиального прироста деревьев. Если оценить ее количественно, то можно получить, что понижение температуры на $0,3^{\circ}\text{C}$ соответствует депрессии в индексах радиального прироста на 0,06. Для длительных изменений индексов в начале XIX в. отмечено устойчивое уменьшение радиального прироста до 0,85, что в таком случае соответствует понижению многолетней температуры на $0,8^{\circ}\text{C}$. Эти оценки не противоречат имеющимся историческим и инструментальным данным (Bradley, 2001; Изменение климата, 2001).

Рассмотрим, существует ли отклик в приросте деревьев, произрастающих в северном полушарии, на мощные вулканические извержения в южном полушарии (рис. 9).

Для южного полушария по сравнению с северным рассмотрено значительно меньше значимых событий ($N=37$). Из рисунка видно, что суммар-

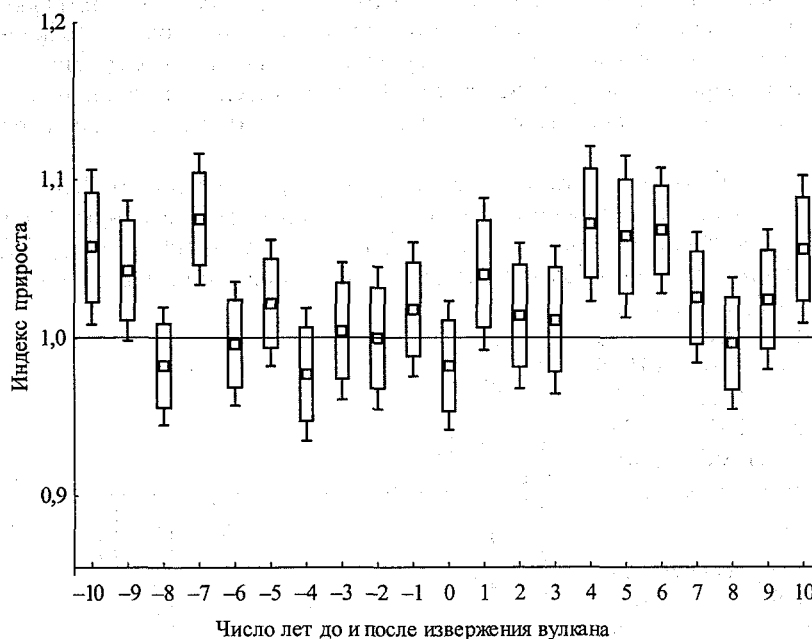


Рис. 9. Кривая реакции прироста деревьев на мощные вулканические извержения в южном полушарии за последнее тысячелетие.

ная кривая по радиальному приросту деревьев, произрастающих на севере Евразии, не показывает четкой реакции на вулканические извержения в южном полушарии. Однако как было показано выше, отдельные наиболее мощные вулканические извержения, например мощное вулканическое извержение Уйянапутина (1600 г.) или Тамбора (1815 г.), повлекли за собой выраженную депрессию прироста у деревьев, произрастающих в субарктических районах северного полушария.

Для более детального анализа нами был проведен отбор календарных дат мощных вулканических извержений в северном полушарии по широтным зонам 0—20°, 20—45°, 45° и выше. Координаты и географическое положение используемых нами вулканов взяты из ранее опубликованных данных (Briffa et al., 1996, 1998; Zielinski, 1994). Для широтных зон 0—20° и 20—45° с. ш. отобрано по 27 дат мощных вулканических извержений. Для широты от 45° и выше зафиксировано наибольшее число вулканических извержений, а именно 46 событий (рис. 10).

Результаты широтного распределения влияния на прирост деревьев севера Евразии вулканических извержений весьма интересны (см. рис. 10). Оказалось, что экваториальные извержения сопровождаются снижением прироста в течение восьми лет. Среднеширотные извержения также сопровождаются снижением прироста, но менее продолжительным по времени, а извержения высоких широт (45° и выше) отражаются на приросте деревьев севера Евразии в течение первых двух лет, а в основном длительная депрессия прироста не отмечается, хотя данные деревья располагаются ближе к Северному полюсу. Существенное влияние экваториальных извержений на погодные условия на севере, вероятно, связано как с особенностями циркуляционных эффектов, так и высотой и составом вулканических выбросов при экваториальных извержениях (Zielinski, 2000). К сожалению, использованные для классификации индексы вулканической активности не позволяют более дифференцированно подойти к оценке такого рода особенностей наиболее мощных извержений.

Таким образом, установлено, что погодичная изменчивость прироста деревьев, произрастающих на севере Евразии, достоверно свидетельствует о глобальных аномалиях климата северного полушария в позднем голоцене, что обусловлено событиями планетарного масштаба, сопряженными с мощной вулканической активностью как известных, так и не зафиксированных историческими данными извержений вулканов 536/537/538, 627/628, 854/855, 1259, 1641/1642, 1783/1784, 1812/1813, 1815/1816, 1883, 1912 гг. (Сидорова, Наурзбаев, 2000). Крупные вулканические извержения в северном полушарии (с индексом вулканической активности ≥ 4) обуславливают понижение температуры и приводят к депрессии роста древесных растений на севере Евразии в течение последующих четырех лет после извержения. Выявлено, что отклик прироста древесных растений на извержения вулканов в разных зонах северного полушария существенно

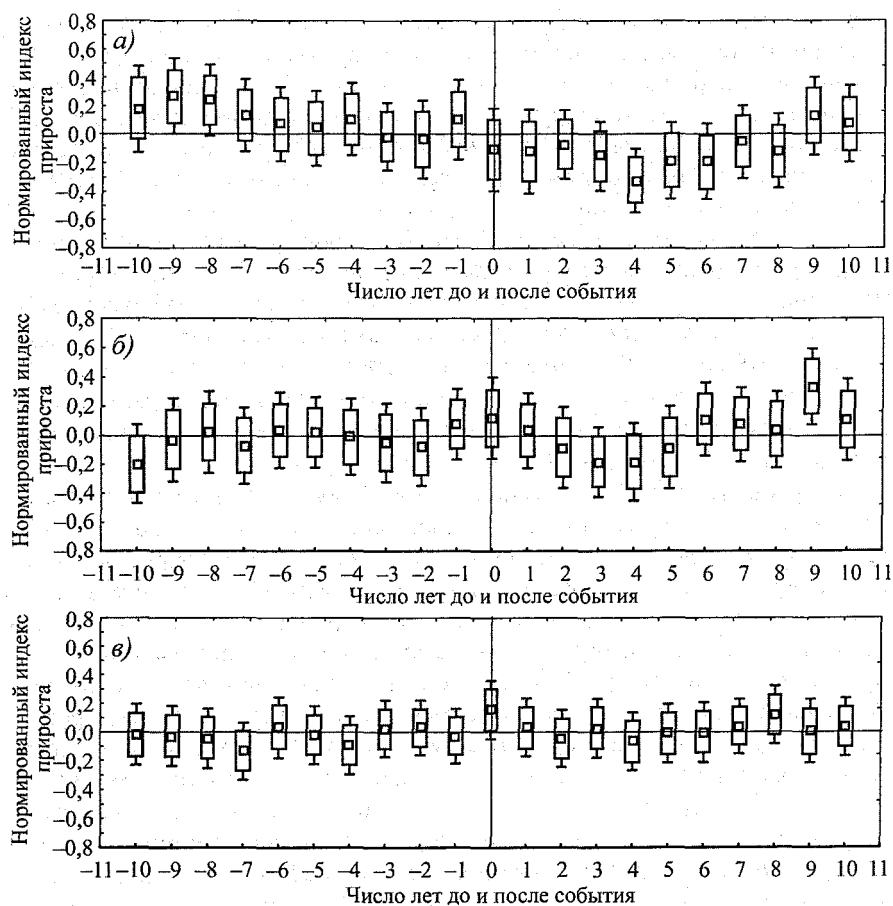


Рис. 10. Реакции прироста деревьев на мощные вулканические извержения, происходящие в низких (а), средних (б) и высоких (в) широтах северного полушария.

различается. Использование тысячелетних древесно-кольцевых хронологий является успешным инструментом для детального анализа и отклика климатической системы на мощные вулканические извержения как на региональном, так и глобальном уровнях.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 02-05-65119, 02-04-49423, научная школа — НШ-2108.2003.4; Интеграционного проекта СО РАН № 121, ККФН № 9Т07.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. 1996. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. — Новосибирск: Наука. — 324 с.

Ваганов Е. А., Бриффа К. Р., Наурзбаев М. М., Швейнгрубер Ф. Г., Шиятов С. Г., Шишов В. В. 2000. Длительные климатические изменения в Арктическом регионе северного полушария. — ДАН, Вып. 375, № 8, с. 1314—1317.

Изменение климата. 2001 / Под ред. Т. Р. Уотсона. Обобщенный доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. — Москва. — 220 с.

Измайлов В. П., Карагиоз О. В., Пархомов А. Г. 1999. Исследование вариаций результатов измерений гравитационной постоянной. — Физическая мысль России, № 1/2, с. 20—26.

Логинов В. Ф. 1984. Вулканические извержения и климат. — Л.: Гидрометеониздат. — 64 с.

Наурзбаев М. М., Ваганов Е. А., Сидорова О. В. 2003. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий. — Криосфера Земли, т. 7, № 2, с. 84—91.

Сидорова О. В., Наурзбаев М. М. 2000. Хронология вулканических извержений, зафиксированная в годичных кольцах деревьев Субарктики восточной Сибири. — Тезисы докладов II совещания. Экология пойм Сибирских рек и Арктики. — Томск, 10 с.

Сидорова О. В., Наурзбаев М. М. 2002. Реакция на климатические изменения лиственницы Каяндера на верхней границе леса и в долине реки Индигирки. — Лесоведение, № 2, с. 73—75.

Хантемиров Р. М. 1999. Древесно-кольцевая реконструкция летних температур на севере Западной Сибири за последние 3248 лет. — Сиб. экол. журн., № 2, с. 185—191.

Baillie M. G. L. 1999. Exodus to arthur, catastrophic encounters with comets. — London: Bastrop Ltd. — 272 p.

Bradley R. S. 2001. Many citations support global warming trend. — Science, N 292, p. 2011.

Bradley R. S., Jones P. D. 1992. Records of explosive volcanic eruptions over the last 500 years. — In: Bradley R. S., Jones P. D. (Eds.). Climate since A.D. 1500. — Routledge, New York, p. 606—622.

Briffa K. R., Jones P. D., Bartholin T. S. et al. 1992. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales. — Climate Dynamics, N 7, p. 111—119.

Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H., Karlen W., Shiyatov S. G. 1996. Tree-ring variables as proxy indicators: Problems with low-frequency signals. — Climate change and forcing mechanisms of the last 2000 years. — Berlin: Springer, NATO ASI Series 141, p. 9—41.

Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H., Osborn T. G. 1998. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperatures over the past 600 years. — Nature, N 393, p. 450—455.

Briffa K. R., Jones P. D., Schweingruber F. H., Osborn T. J., Shiyatov S. G., Vaganov E. A. 1998a. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. — Nature, N 391, p. 672—682.

Cole-Dai J., Mosley-Thompson E., Wight S. P., Thompson L. G. 2000. A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core. — J. Geophys. Res., v. 105, N 19, p. 24.431—24.441.

D'Arrigo R., Frank D., Jacoby G., Pederson N. 1999. Spatial response to major volcanic events in or about AD 536, 934 and 1258: Frost rings and other dendrochronological evidence from Mongolia and northern Siberia. — Climatic Change, N 42, p. 31—34.

De Silva S.L., Zielinski G. A. 1998. Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. — *Nature*, N 393, p. 455—458.

Grudd H., Briffa K. R., Karlen W., Bartholin T. S., Jones P. D., Kromer B. 2002. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. — *The Holocene*, v. 12, N 6, p. 657—665.

Hantemirov R., Shiyatov S. G. 2002. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia. — *The Holocene*, v. 12, N 6, p. 717—727.

Hughes M. K., Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Touchan R., Funkhouser G. 1999. Twentieth-century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context. — *The Holocene*, v. 9, N 5, p. 603—608.

Krakauer N. Y., Randerson J. T. 2003. Do volcanic eruptions enhance or diminish net primary production? — *Global Biogeochemical Cycles*, v. 7, N 4, p. 1118—1129.

Lara A., Villalba R. 1993. A 3620-year temperature record from Fitzroya cupressoides tree rings in Southern America. — *Science*, N 260, p. 1104—1106.

Lough J. M., Fritts H. C. 1987. An assessment of the possible effects of volcanic eruptions on North American climate using tree-ring data, 1602 to 1900 A.D. — *Climatic Change*, N 10, p. 219—239.

Naurzbaev M. M., Vaganov E. A., Sidorova O. V., Schweingruber F. H. 2002. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series. — *The Holocene*, v. 12, N 6, p. 727—736.

Rigby E., Symonds M., Ward-Thompson D. 2004. A comet impact in AD 536. *Astronomy and Geophysics*, v. 45, p. 123—126.

Shiyatov S. G. 1996. Tree growth decrease between AD 1800 and 1840 in Subarctic and highland regions of Russia. — In: *Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference, Tucson, Arizona, 1994*, p. 283—294.

Stothers R. 1984. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. — *Science*, N 224, p. 1191—1198.

Stothers R. 1999. Volcanic dry fogs, climate cooling and Plague pandemics in Europe and the Middle East. — *Climate Change*, N 42, p. 713—723.

Stothers R. 2000. Climatic and demographic consequences of the massive volcanic eruption of 1258. — *Climatic Change*, N 45, p. 361—374.

Thompson L. G. 1989. Ice-core records with emphasis on the global record of the last 2000 years. — In: *Global changes of the past* (R. Bradley, ed.). UCAR/OIES, Boulder, Colorado, p. 201—224.

Zetterberg P., Eronen M., Briffa K. R. 1995. A 7500-year pine tree-ring record from Finish Lapland and its applications to paleoclimatic studies. — In: *Proceedings of the SILMU International Conference on Past, Present and Future Climate, Helsinki*, p. 151—154.

Zielinski G. A. 2000. Use of paleo-records in determining variability within the volcanism-climate system. — *Quaternary Science Reviews*, N 19, p. 417—438.

Zielinski G. A., Germani M., Larsen G. et al. 1995. Evidence of the Eldja (Iceland) eruption in the GISP2 Greenland ice core: Relationship to eruption processes and climatic conditions in the tenth century. — *The Holocene*, v. 5, N 5, p. 129—140.

Zielinski G. A., Mayewski P. A., Meeker L. D. et al. 1994. Record of volcanism since 7000 B.C from the GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climatic system. — *Science*, N 264, p. 948—952.

**АНАЛИЗ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РЕГИОНЕ
ПОЛЯРНОГО УРАЛА — СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
ПО ДАННЫМ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ**

М. Ю. Бардин

РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии
Росгидромета и РАН, mbardin@mecom.ru

Реферат. На основе избранных рядов дендрохронологических индексов по региону Полярного Урала — севера Западной Сибири, опубликованных Е. А. Вагановым, С. Г. Шиятовым и В. С. Мазепой, исследованы основные особенности долгопериодной климатической изменчивости в регионе с использованием различных методов спектрального анализа, включая вейвлетное преобразование и сингулярный анализ. Показано наличие выраженных колебаний с периодами около 10 и 20 лет, а также 60—70 лет, соответствующих основным модам климатической изменчивости Северной Атлантики, а также колебания с периодом 30—40 лет, особенно ярко проявляющегося как в дендрохронологиях, так и в инструментальных рядах данных о температуре воздуха в регионе в XX в. Проанализирован сигнал современного потепления в рядах древесно-кольцевых индексов. Установлено, что дендрохронологии не воспроизводят адекватно региональный тренд потепления в XX в. Показано, что это обстоятельство может быть связано с выбранной методикой исключения возрастного тренда в рядах ширины годовых колец деревьев.

Ключевые слова. Климатическая изменчивость, дендрохронологии, спектр колебаний, температура воздуха, глобальное потепление.

**THE ANALYSIS
OF LONG-TERM AIR TEMPERATURE VARIABILITY
IN POLAR URALS REGION — NORTHERN WESTERN SIBERIA
USING DENDROCHRONOLOGICAL RECONSTRUCTIONS**

M. Yu. Bardin

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str.,
107258 Moscow, Russia, mbardin@mecom.ru

Abstract. Principal features of long-term climatic variability in the region of the Polar Urals — Northern Western Siberia are investigated using time series of dendrochronological indices published by E. A. Vaganov, S. G. Shiyatov and V. S. Mazepa. Different spectral analysis techniques including the wavelet trans-

form and singular spectrum analysis are employed. The pronounced cycles of periods of about 10 and 20 years and 60—70 years have been demonstrated. This corresponds to the major modes of climatic variability in the North Atlantic. The cycle with 30—40 years period occurred the most pronounced in the region in the 20th century both in dendrochronologies and in the instrumental temperature records. It was shown that dendrochronologies do not adequately reproduce the regional warming trend in the 20th century. This is found to be possibly caused by chosen technique for the filtering out the age trend from the tree-ring series.

Keywords. Climatic variability, dendrochronology, spectrum of oscillations, air temperature, global warming.

Введение

Одной из центральных задач программы Всемирной метеорологической организации „Изменчивость и предсказуемость климата” (CLIVAR, 1998) в рамках ее раздела Dec-Cen („Десятилетия — столетия”) является исследование колебаний климата Северной Атлантики с временными масштабами от десятилетия до нескольких десятилетий и их проявлений в климате окружающих регионов. В настоящее время известно несколько „мод” таких колебаний с периодами около 10 и 20 лет (Deser, Blackmon, 1993; Hurrell, 1995; Бардин, 2002; Полонский и др., 2004). Сингулярный анализ данных наблюдений (Schlesinger, Ramankutty, 1994, 1995) выявил наличие долгопериодного колебания с периодом 65—70 лет, проявляющегося над Северной Атлантикой и окружающими континентальными областями; возможные его механизмы (включающие взаимодействие циркуляции атмосферы и термохалинной циркуляции в Северной Атлантике) анализируются в работе (Timmermann et al., 1998). Однако само наличие такой моды ставится под сомнение некоторыми авторами: указывается на недостаточно длинные ряды наблюдений (немногим более 10 лет); в некоторых длинных рядах наблюдений на отдельных станциях Европы сигнал не был обнаружен (Даценко и др., 2000). С другой стороны, некоторые палеоклиматические реконструкции подтверждают его наличие (Mann et al., 1995; Cook et al., 1998). Цель настоящей статьи — на основе опубликованных дендрохронологических данных для севера Урала — Западной Сибири за последние 400—450 лет исследовать проявление в спектре климатических колебаний в регионе указанных десятилетних и междесятилетних мод с использованием различных техник спектрального анализа, а также проявление в дендрохронологиях современного потепления.

Методы и материалы

Использованы данные древесно-кольцевых хронологий, опубликованные в работе (Ваганов и др., 1996). Анализировалась крайняя западная часть рассматриваемого авторами региона (к западу от 75° в. д.: Полярный

Урал и район Обской губы), где еще непосредственно проявляются эффекты, связанные с североатлантическим колебанием (САК): колебания циклонической активности. Были отобраны (субъективно) 7 древесно-кольцевых хронологий, имеющих по возможности наиболее длинные ряды и одновременно высокие значения показателей, характеризующих вклад климатического сигнала (чувствительность — характеристика относительной межгодовой изменчивости; стандартное отклонение, или масштаб изменчивости; отношение сигнал/шум — характеристика корреляции индивидуальных хронологий внутри участка) (Ваганов и др., 1996, табл. 6). Данные об участках, по которым собраны первичные данные о ширине годичных колец и о соответствующих хронологиях, выбранные из цитированного источника, приведены в табл. 1. Отметим, что один участок (*CHA*) расположен чуть восточнее, но у него очень высокие показатели „чувствительности”; с другой стороны, чувствительность у *PPP* низкая, но это единственная в районе хронология по ели (кроме того, представляет интерес сравнение спектральных свойств ряда с низкими показателями чувствительности с остальными). Попутно отметим, что „чувствительность” — это не коэффициент вариации, как можно было бы подумать (авторы не приводят формул, а только приведенные выше словесные описания), а, по-видимому, величина $(n-1)^{-1} \sum_{1 \leq i < n} \text{abs}(x_{i+1} - x_i) / (0,5 \text{abs}(x_{i+1} + x_i))$ (экспериментальный факт). Авторы описывают процедуру получения обобщенных хронологий от отбора кернов и измерения ширин колец до построения статистических моделей для получения индивидуальных (для отдельных деревьев) нормированных индексов и их последующего обобщения по участку. К сожалению, статистическая часть процедуры описана

Таблица 1

Общая характеристика древесно-кольцевых хронологий
по (Ваганов и др., 1996)

№ п/п	Код	Координаты участка		Продолжи- тельность	Вид де- ревьев	Отношение сигнал— шум	Средняя чувстви- тельность	Стандарт- ное откло- нение, %
		широта	долгота					
1	<i>PDP</i>	65° 30'	69° 42'	1507—1992	<i>L.s.</i>	17	0,29	26
2	<i>SOB</i>	66° 48'	65° 46'	1563—1992	<i>L.s.</i>	27	0,47	37
3	<i>CHA</i>	67° 28'	76° 46'	1564—1990	<i>L.s.</i>	31	0,46	37
4	<i>JAH</i>	67° 25'	70° 58'	1577—1991	<i>L.s.</i>	30	0,41	33
5	<i>PLL</i>	65° 27'	68° 56'	1561—1992	<i>L.s.</i>	17	0,30	26
6	<i>PPP</i>	65° 21'	69° 31'	1600—1992	<i>P.o.</i>	12	0,19	17
7	<i>KHA</i>	67° 12'	69° 50'	1630—1990	<i>L.s.</i>	14	0,40	33

Примечание. *L. s.* — *Larix sibirica* (лиственница); *P. o.* — *Picea obovata* (ель).

недостаточно подробно не только для того, чтобы ее можно было воспроизвести, но и для того, чтобы оценить ее влияние на результаты: некоторые возникающие в связи с этим проблемы обсуждаются в основной части статьи.

Для оценки вариаций температуры в рассматриваемом районе использовались данные постанционных наблюдений на семи станциях с длинными рядами данных, ближайших к району (табл. 2). Эти станции входят в состав базы данных мониторинга климата Российской Федерации, осуществляющегося в ИГКЭ (Груза, Ранькова, 2004); данные на них регулярно пополняются и подвергаются необходимой обработке (оперативный контроль и коррекция; регулярное пополнение и замена верифицированными данными). Анализировались данные за летний сезон (июнь—август) 1891—2000 гг.; для получения сезонных средних значений по району осреднялись аномалии температуры (отклонения от многолетних средних за весь рассматриваемый период).

Таблица 2

Метеорологические станции, использовавшиеся для оценки изменений температуры

№ п/п	Станция	Код	Координаты		Начало наблюдений
			широта	долгота	
1	Салехард	23330	66,5	66,5	1891
2	Березово	23631	63,9	65,0	1891
3	Троицко-Печерское	23711	62,7	56,2	1891
4	Октябрьское	23734	62,4	66,0	1904
5	Сургут	23849	61,3	73,5	1891
6	Чердынь	23914	60,4	56,5	1891
7	Ханты-Мансийск	23933	61,0	69,1	1897

При анализе главных компонент (естественных ортогональных функций — ЕОФ) все ряды приводились к единичной дисперсии.

Основной инструмент спектрального анализа — быстрое преобразование Фурье, где оценка периодограммы получается напрямую, без предварительной оценки корреляционной функции. Как известно, для получения состоятельной оценки спектра периодограмма должна быть сглажена. Мы применяли для этого окно Хэмминга с весами (0,035714; 0,241071; 0,446429; 0,241071; 0,035714).

Для качественного анализа спектральных свойств нестационарных рядов удобно использовать вейвлетное преобразование (Torrence, Compo, 1998). Его идея состоит в том, чтобы оценивать спектральный состав колебаний не в целом для всего ряда, как в обычном спектральном анализе, а

локально, в окрестности каждой точки на оси времени, используя для оценки интенсивности (дисперсии, энергии) колебаний определенного временного масштаба свертку со специально подобранной симметричной функцией, быстро убывающей вне интервала с характерным масштабом рассматриваемого колебания (так называемая „материнская вейвлетная функция”). Таким образом, вейвлетное преобразование $W(a, b)$ временного ряда $X(t)$ рассчитывается как

$$W(a, b) = a^{-1/2} \int \Psi^* ((t - a)/b) X(t) dt,$$

где $\Psi(t; a, b)$ — материнская вейвлетная функция, a — параметр сдвига (время), b — масштаб. Здесь мы используем вещественное преобразование с материнской функцией „Мексиканская шляпа”, которая определяется как вторая производная от гауссовой функции $\exp(-t^2/2)$ с соответствующим нормирующим множителем. Вещественное преобразование $W(a, b)$ можно рассматривать как ковариацию ряда X в момент времени a с колебанием с периодом b и нулевой фазой; таким образом, колебание в ряду представляется последовательностью локальных минимумов и максимумов $W(a, b)$ вдоль $b = \text{const}$.

Наконец, мы воспользуемся сингулярным разложением временного ряда или, что то же самое, разложением по ЕОФ времени (Vautard, Ghil, 1989). Это разложение формально аналогично разложению по пространственным ЕОФ, только „векторами” служат временные последовательности $\{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+N-1}\}$ фиксированной длины N . В этом случае ЕОФ получаются как решения задачи на собственные значения для Теплицевой матрицы $C_{i,j}$, у которой на малых диагоналях $C_{i,j+L}$ помещается автокорреляция ряда при сдвиге L ($L \leq N$). Ведущие сингулярные компоненты характеризуют „наиболее типичные формы” изменений во времени, наблюдающиеся в ряду. Мы используем следующее свойство разложения временного ряда по ЕОФ времени, если: а) в разложении имеются два одинаковых собственных числа, б) соответствующие ЕОФ представляют собой колебания с периодом T с фазовым сдвигом в $1/4$ периода, то в ряду имеется циклическая компонента с периодом T .

Результаты

Статистические характеристики рассматриваемых хронологий представлены в табл. 3. Отметим, что стандартные отклонения, рассчитанные нами, немного отличаются от приведенных в работе (Ваганов и др., 1996) (см. табл. 1). Немного различаются также и средние обобщенных хронологий (не приведены): они варьируют от 99,2 до 100,5. Поскольку индивидуальные хронологии нормированы таким образом, что средние их равны 100, это происходит в результате процедуры обобщения по участку: авто-

Статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий

№ п/п	s	Корреляции хронологий							$r(T, *)$	$rF_2^7(T, *)$	$rF_7(T, *)$	$rF_{25}(T, *)$	ЕОФ ₁	Тренд (1891—1992)	
		1	2	3	4	5	6	7						A_1	$D_{lr}(\%)$
1	25,8	1	0,61	0,39	0,50	0,79	0,43	0,55	0,32	0,36	0,36	0,56	0,81	-0,2	0
2	38,2	0,61	1	0,45	0,65	0,55	0,34	0,67	0,53	0,49	0,66	0,89	0,82	+1,3	1,1
3	37,5	0,39	0,45	1	0,55	0,36	0,31	0,59	0,38	0,37	0,45	0,48	0,68	0,0	0
4	35,7	0,50	0,65	0,55	1	0,44	0,30	0,75	0,47	0,45	0,52	0,59	0,80	-0,0	0
5	25,9	0,79	0,55	0,36	0,44	1	0,45	0,52	0,26	0,27	0,25	0,34	0,77	-0,3	0
6	17,6	0,43	0,34	0,31	0,30	0,45	1	0,34	0,32	0,39	0,15	-0,26	0,56	-0,1	0
7	34,6	0,55	0,67	0,59	0,75	0,52	0,34	1	0,48	0,41	0,59	0,81	0,84	+0,3	0

Примечания. s — среднеквадратическое отклонение; $r(T, *)$ — корреляция со средней температурой региона за 1891—1992 гг.; $rF_2^7(T, *)$ — то же для рядов, сглаженных с применением полосового фильтра, пропускающего колебания с периодами от 2 до 7 лет; $rF_7(T, *)$ — то же для рядов, сглаженных с применением фильтра, отсекающего колебания с периодами менее 7 лет; $rF_{25}(T, *)$ — то же для рядов, сглаженных с применением фильтра, отсекающего колебания с периодами менее 25 лет; ЕОФ₁ — проекции стандартизованных перемещений на 1-ю ЕОФ хронологий в регионе; оценки линейного тренда за 1891—1992 гг.: A_1 — коэффициент линейного тренда (единиц / 10 лет); $D_{lr}(\%)$ — вклад тренда в суммарную дисперсию. Оценки s, ЕОФ₁ получены за полный период, для которого доступна хронология, взаимные корреляции хронологий — за период, когда доступны обе хронологии (см. табл. 1).

ры „выбирали одну из следующих оценок: арифметическое среднее, робастное оценивание или максимальную моду при полимодальном распределении” (цит. соч., с. 43). Конечно, арифметическое осреднение даст ровно 100, а для двух других способов возможны отклонения — почти 1 % для *SOB*. Взаимные корреляции варьируют от 0,3 до почти 0,8 и в общем не соответствуют утверждению авторов, что между хронологиями для участков, расположенных не далее 300 км один от другого, корреляции составляют 0,7—0,8 (цит. соч., с. 54). Самые низкие корреляции с другими у хронологии 6 (*PPP*), отмеченной выше. Ведущая ЕОФ 7-мерного вектора рассматриваемых хронологий объясняет почти 60 % суммарной дисперсии и близка к среднему по всем хронологиям, с заметно меньшим весом 6-й: *PPP* (в 1,5 раза) и также несколько меньшим — *СНА*. Оценки трендов мы рассмотрим позже.

Корреляция со средней летней температурой региона в 1891—1992 гг. варьирует от 0,26 для хронологии 5 (*PLL*) до примерно 0,5 (2 — *SOB*, 4 — *ЖАН*, 7 — *КНА*). Для наших целей полезно рассмотреть, как распределяется эта корреляция по спектру колебаний, т. е. выяснить, на каких масштабах корреляция наиболее высока. Вместо того чтобы рассматривать взаимные спектры, мы рассмотрим более простую статистику, а именно, корреляцию рядов, сглаженных фильтром, отсекающим колебания ниже заданного порога. Были выбраны два порога в соответствии со сказанным во введении: 7 и 25 лет. „В среднем” (для ЕОФ-1) полоса >7 лет содержит около 35 % дисперсии, а полоса >25 лет — 15 %. Наилучшая корреляция в области долгопериодных (>25 лет) колебаний с наблюдаемой температурой у рядов 2 — *SOB* (почти 0,9) и 7 — *КНА*; в то же время ряды 6 (*PPP*) и 5 (*PLL*) демонстрируют очень слабую корреляцию с температурой в долгопериодной области. Для *PPP* вообще, как ни странно, наибольший вклад в изменчивость дают относительно высокочастотные колебания температуры с периодами менее 7 лет: этот вопрос, видимо, требует специального анализа. Максимальный вклад полосы частот 7—25 лет (т. е. максимальный рост корреляции от $rF_7(T,*)$ к $rF_{25}(T,*)$) наблюдается у рядов 1 — *PDP*, 2 — *SOB*, 7 — *КНА*.

На рис. 1 представлены оценки спектра для каждой из семи хронологий и для ведущей ЕОФ отдельно для полосы долгопериодных колебаний с периодами более 30 лет и с периодами одно-два десятилетия. В полосе долгопериодных колебаний выделяется пик около 60—70 лет, наиболее выраженный для хронологий 2 — *SOB*, 4 — *ЖАН*, 7 — *КНА*, несколько более слабый для 3 — *СНА* и слабо выраженный для 1 и 5. Для хронологии же 6 (*PPP*) он полностью отсутствует. Имеется также „вторичный” максимум около 30—40 лет, так или иначе заметный для всех хронологий.

В полосе одно-два десятилетия отметим, прежде всего, характерный двойной пик около 10 лет, выраженный в спектре 1-й ЕОФ давления над Северной Атлантикой (диполя, характеризующего североатлантическое колебание (Бардин, 2003)) и температуры над западными районами РФ

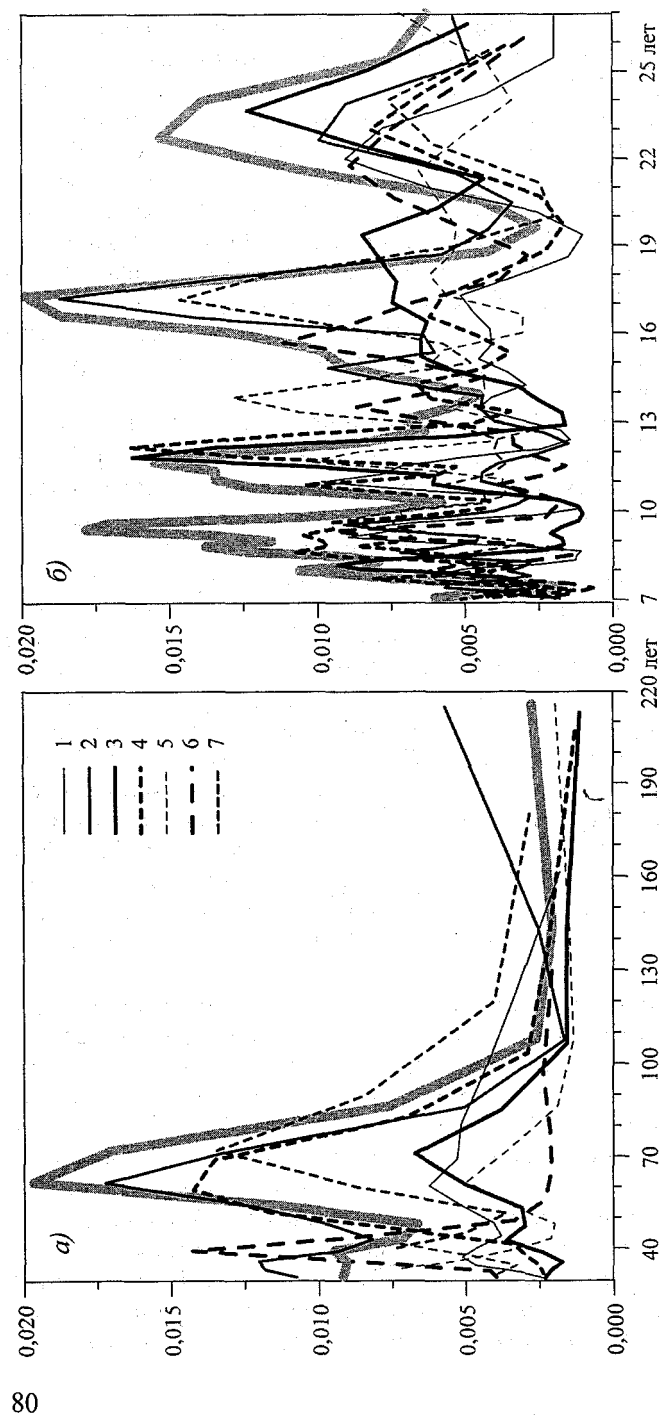


Рис. 1. Спектры колебаний индивидуальных древесно-кольцевых хронологий (номера соответствуют табл. 1) и ведущей ЕОФ хронологий (толстая серая линия) в регионе Полярного Урала — севера Западной Сибири для полюсы частот 30—220 лет (а) и 7—30 лет (б).

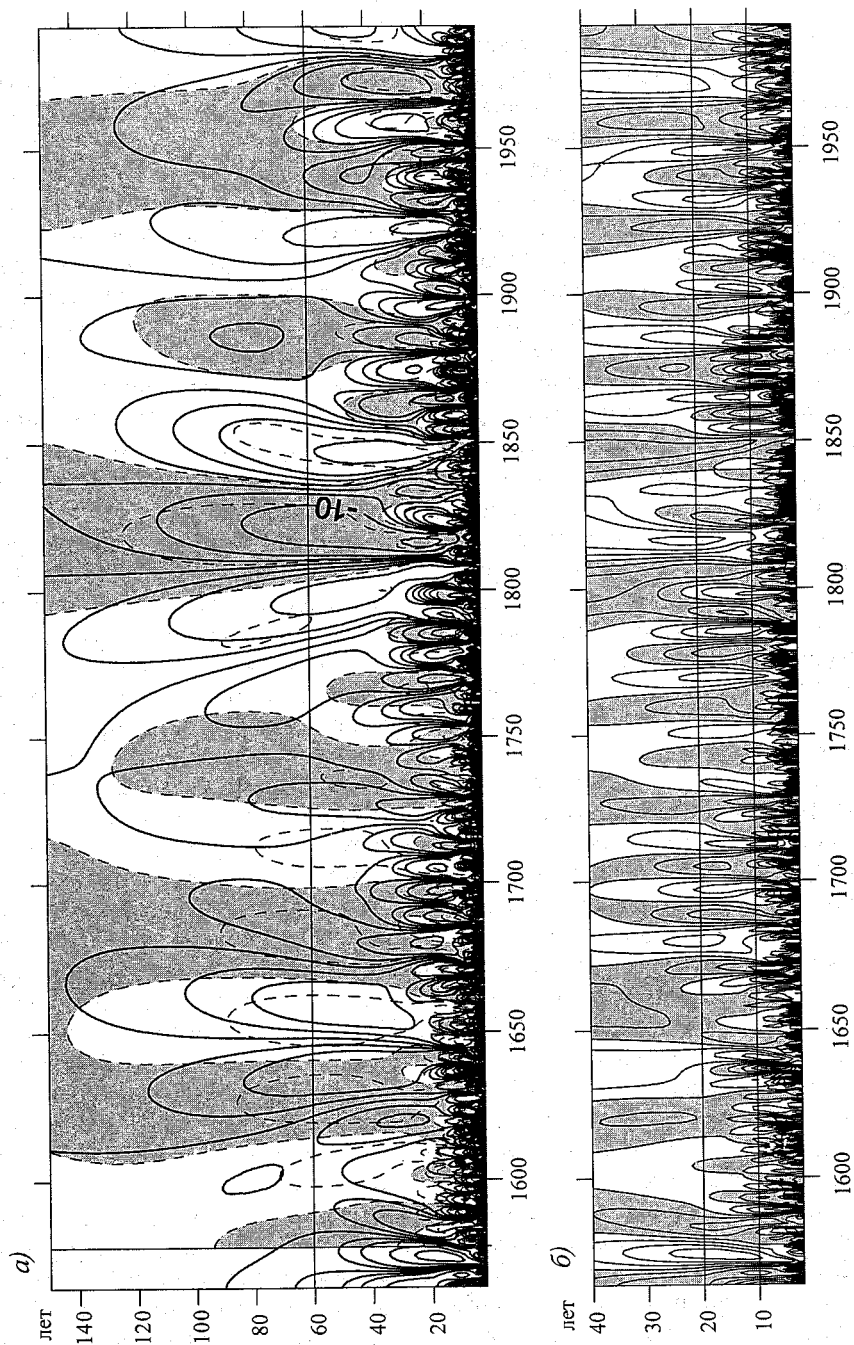
Ряды приведены к единичной дисперсии.

(Бардин, 2002). Этот пик выражен в североатлантическом колебании в зимний период; однако он, вероятно, влияет на летние температуры (и, возможно, осадки) через вариации ледяного покрова Арктического океана (Deser et al., 2000) и его температуры и солености (McPhee et al., 1998). В дендрохронологиях эта мода наиболее выражена в рядах 3 и 4 (*СНА*, *ЈАН*).

Два других пика наблюдаются около 17 и 23 лет и соответствуют характерным масштабам временной изменчивости приповерхностной температуры воды в Северной Атлантике (Полонский и др., 2004; Deser and Blackmon, 1993). Кроме того, наш анализ спектра колебаний давления над Северной Атлантикой показывает наличие выраженного колебания с периодом 15—18 лет у 1-й ЕОФ летом и 2-й ЕОФ зимой, а анализ соответствующих штормтреков показывает их принципиальное различие на севере Евразии в противоположных фазах указанных колебаний (не опубликовано), так что на этих периодах влияние Северной Атлантики может быть непосредственным, что и проявляется в большей выраженности указанных пиков в целом, т. е. для ряда 1-й главной компоненты.

Картины вейвлетных преобразований (на рис. 2 они показаны для рядов 2 — *SOB* и 4 — *ЈАН*) подтверждают наличие указанных колебаний. На рис. 2 *а*, где вейвлетные преобразования совмещены, хорошо видно колебание в обоих рядах и хорошая синфазность, за исключением смещения максимума около 1725 г. примерно на 15 лет, причем для ряда *ЈАН* он соответствует периоду около 40 лет. Долгопериодная мода проявляется на 40 годах также в XX в. Это отчетливо проявляется на рис. 3, где приведены сглаженные ряды индекса *ЈАН* (1-й главной компоненты дендрохронологий) и аномалии летней температуры региона. Очевидно, что в XX в. характерный масштаб долгопериодных колебаний — около 40 лет (что также подтверждается спектром колебаний температуры). Стоит отметить, что такое положение дел определяется наложением колебания с периодом около 30—40 лет с всплеском температуры в 1950—1960 гг. на фоне „регулярного” (т. е. синфазного с изменением NAO) похолодания, закончившегося в начале 1970-х годов. Этот всплеск наблюдается как в летних, так и в зимних температурах в северных и средних широтах западной части бывшего СССР (см. Бардин, 2002, рис. 1). Подобные колебания с периодом 30—40 лет на фоне долгопериодного 60—70-летнего колебания отчетливо видны на рис. 3 как для индивидуальной хронологии *ЈАН*, так и в ряду 1-й ГК на всем их протяжении; причину этого колебания предстоит исследовать. В любом случае, эти колебания температуры в XX в. хорошо воспроизводятся всеми хронологиями, кроме *PPP*.

На рис. 2 *б* и *в* представлены также растянутые по ординате для большей наглядности вейвлетные преобразования тех же рядов для периодов от 2 до 40 лет, иллюстрирующие картину изменчивости в полосе 10—20 лет. Колебания этих масштабов проявляются неравномерно: 11—12-летние колебания (особенно заметные для *ЈАН*) наблюдаются в начальных частях рядов и во второй половине 1800-х годов; более короткопери-



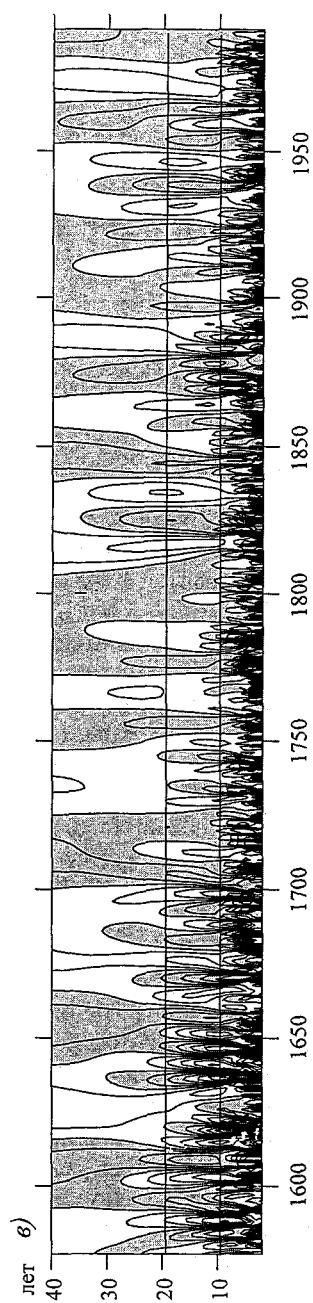


Рис. 2. Совмещенные картины веялетних преобразований для хронологий 2 — *SOB* (сплошная линия) и 4 — *JAH* (штриховая линия, отрицательные значения затенены) (а) и отдельно для 2 — *SOB* (б) и 4 — *JAH* (в) в полосе периодов 2—40 лет с увеличенным масштабом по оси ординат.

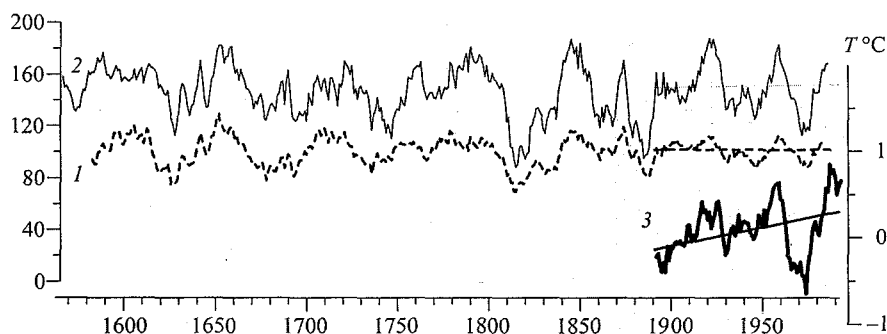


Рис. 3. Временные ряды хронологии *JAH* (1), ЕОФ-1 (2) (усл. ед.) и средней летней аномалии температуры региона (3) ($^{\circ}\text{C}$), сглаженные 13-летним скользящим осреднением.

Показаны линейные тренды за период 1891—1992 гг.

одные, около 7—9 лет, заметны в первой и последней четвертях XX в. (напомним, что эти моды САК проявляются в основном в зимний период). В то же время, колебания с периодами 15—20 лет наблюдаются практически постоянно в ряду *SOB* с последней четверти 1600-х годов, а в *JAH* — с 1800-х годов. С чем связаны такие различия в поведении хронологий в этих полосах частот, не вполне понятно. Можно было бы предположить, что более короткопериодные 10-летние колебания лучше улавливаются в начале рядов, где ширины годовичных колец значительно больше, однако это противоречит данным табл. 3 о корреляции хронологий с температурой в высокочастотной области (полосе 2—7 лет): эти корреляции достаточно высоки (почти 0,5 для тех же *JAH* и *SOB*), так что поздние хронологии улавливают еще более высокочастотные колебания. Здесь стоит отметить, что такие изменения интенсивности климатических колебаний во времени наблюдаются и в других случаях, например в Эль-Ниньо—южном колебании (ЭНЮК) (Webster et al., 1998).

Наконец, обратимся к сингулярным разложениям. На рис. 4 представлены первые две сингулярные компоненты (ЕОФ времени) хронологии *JAH*, сглаженной фильтром, отсекающем колебания с периодом менее 15 лет. Это сглаживание необходимо для выделения только долгопериодной компоненты: кривая 3 демонстрирует 1-ю сингулярную компоненту, полученную по несглаженному ряду, а также короткопериодные колебания, наложенные на 60-летнее; удаления только короткопериодных (<7 лет) колебаний оказывается недостаточно — на соответствующей кривой 4 хорошо прослеживаются колебания с периодом около 12 лет. Компоненты 1 и 2 имеют примерно равные дисперсии, составляющие около 15 % суммарной дисперсии в полосе колебаний с периодами >15 лет каждая, периоды около 60 лет, и их фазовый сдвиг составляют около 15 лет, т. е. четверть периода. Таким образом, эта пара сингулярных компонент опреде-

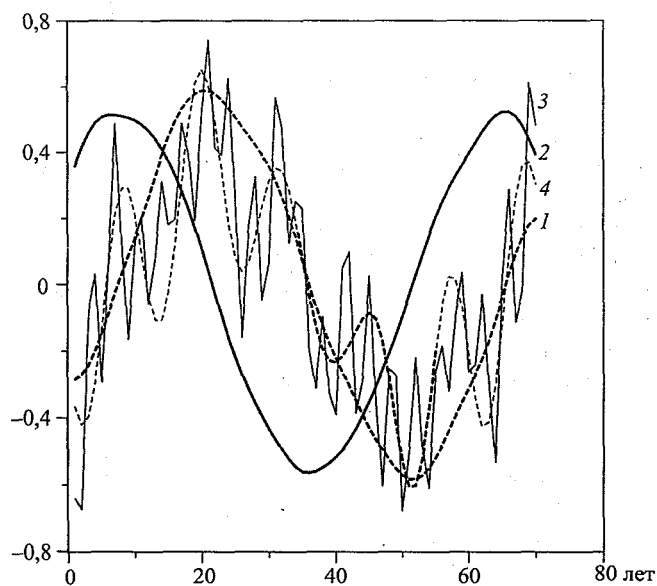


Рис. 4. Первые две ведущие сингулярные компоненты (ЕОФ времени) хронологии *ЖАН*, сглаженной с применением фильтра, отсекающего колебания с периодами < 15 лет (1, 2); первая сингулярная компонента несглаженного ряда (3); первая сингулярная компонента ряда, сглаженного с применением фильтра, отсекающего колебания с периодами < 7 лет (4).

ляет колебание в ряду *ЖАН* с периодом 60 лет, объясняющее около 30 % изменчивости в полосе > 15 лет. Аналогичный результат получается для пространственной ЕОФ-1 рассматриваемых семи хронологий: первые две сингулярные компоненты соответствующего ряда (сглаженного до периодов > 15 лет) определяют колебание с периодом около 60 лет, объясняющее 34 % дисперсии сглаженного ряда. Следующие две компоненты (3-я и 4-я) определяют колебание с периодом около 23 лет, объясняющее 19 % дисперсии сглаженного ряда. Суммарно эти два колебания (60 и 23 года) определяют более 50 % дисперсии долгопериодных (> 15 лет) колебаний.

Таким образом, можно считать установленным факт наличия в рассматриваемых хронологиях колебаний с периодами около 10, 23 и 60 лет, а также вторичных пиков около 17 и 40 лет, что подтверждает результаты, полученные по данным наблюдений.

Перейдем теперь к вопросу о трендах современного потепления в рассматриваемых рядах. В представленном на рис. 3 ряду средней летней аномалии температуры региона очевидно проявляется как последнее потепление XX в. (с середины 1970-х годов), так и столетний тренд начиная с

1891 г. Последний составляет $0,046\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ и объясняет около 2 % дисперсии, что несколько больше, чем в целом по Европейской части РФ ($0,032\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, 1,5 %). Однако в рядах дендрохронологий, кроме 2 *SOB*, тренд, по существу, отсутствует (объясняет ничтожную долю дисперсии: $<0,1\%$) (см. табл. 3). Это обстоятельство нельзя объяснить недостаточной чувствительностью дендрохронологий к таким сравнительно небольшим по величине изменениям температуры: тот же рис. 3 отчетливо демонстрирует очень хорошее воспроизведение сравнимых по величине более короткопериодных колебаний с периодами 30—40 лет (корреляция сглаженных фильтром, отсекающим колебания с периодом $<25\text{ лет}$, рядов температуры и ЕОФ-1 дендрохронологий равна 0,84, а с рядом *ЛАН* — почти 0,9!). По-видимому, дело здесь в процедуре индексирования индивидуальных рядов ширины годичных колец, а точнее, в процедуре исключения возрастного тренда. Как следует из работы (Ваганов и др., 1996, с. 39), возрастной тренд аппроксимировался полиномиальным сплайном, т. е. весь ряд разбивался на интервалы определенной длины, на каждом из которых к данным подгонялся полином (в книге нет сведений ни о конкретных длинах интервалов аппроксимации, ни о порядке полиномов), а ряд индексов получался делением исходных значений погодичного прироста на величину подогнанного полинома. Такая процедура, вполне вероятно, эффективно удаляет возрастной тренд, но в то же время почти неизбежно удаляет и тренды другой (например, климатической) природы с характерными масштабами столетия. Иллюстрацией может служить приведенный в книге на рис. 2 пример удаления возрастного тренда из ряда ширины годичных колец *ЛАН081* (воспроизводится в настоящей статье на рис. 5). В исходном ряду очевиден возрастающий тренд с конца XIX в., особенно заметный в ряду максимумов; после применения процедуры удаления возрастного тренда этот рост фактически исчезает. Кроме того, эта же процедура приводит к очевидному систематическому занижению амплитуды межгодовой изменчивости к концу ряда (ср. величины колебаний в 1920—1930 гг. и в 1990-е годы в исходном ряду и ряду с исключенным возрастным трендом: если в исходном ряду различия амплитуд примерно в 1,5 раза, то в преобразованном — более чем в 3 раза), что происходит за счет *деления на возрастающую величину* возрастного тренда. В то же время, сам вид рядов годичных колец предполагает, что их следует аппроксимировать монотонно-убывающими функциями. Например, если сделать грубые допущения, что начиная с определенного возраста объем кроны и корневой системы дерева, его высота и объем камбиального слоя, определяющего годичный прирост ксилемы (древесины), остаются примерно постоянными (т. е. постоянен объем питания и число делящихся клеток камбия), то можно получить, что постоянен годичный прирост *площади* поперечного сечения (из-за постоянства высоты дерева). Тогда $dS/dt \sim dR^2/dt = \text{const}$; $R^2 = at + b$; $dR/dt \sim (at + b)^{-1/2}$, т. е. прирост обратно пропорционален кор-

ню квадратному из линейной функции времени. Грубая подгонка функции такого вида к исходному ряду, оцифрованному вручную (с использованием процедуры типа градиентного спуска, но не одновременно по a и b , а последовательно; подгонка выполнялась на отрезке от начала ряда до 1890 г.), показана на рис. 5. По всей видимости, она дает слишком быстрое убывание после 1890 г. (в частности, линейный тренд начиная с 1891 г. „реконструкции температуры”, т. е. регрессии ряда ширины колец с исключенными в соответствии с предложенной моделью возрастными изменениями на температуру более чем в два раза переоценивает тренд наблюдаемой температуры). Вероятно, только с момента, когда сам по себе рост стал мал (начало XIX в.), и следовало подгонять такую функцию, а для более раннего периода нужен другой вид аппроксимирующей функции; кроме того, видимо, лучше отдельно подгонять кривые для среднего e и стандартного отклонения s (скользящих) и стандартизовать ряд обычным способом: $x^* = (x - e)/s$, исключая таким образом очевидный возрастной тренд дисперсии. Во всяком случае, общее поведение ряда качественно описывается вполне разумно. Разумеется, здесь не ставилась цель разработать

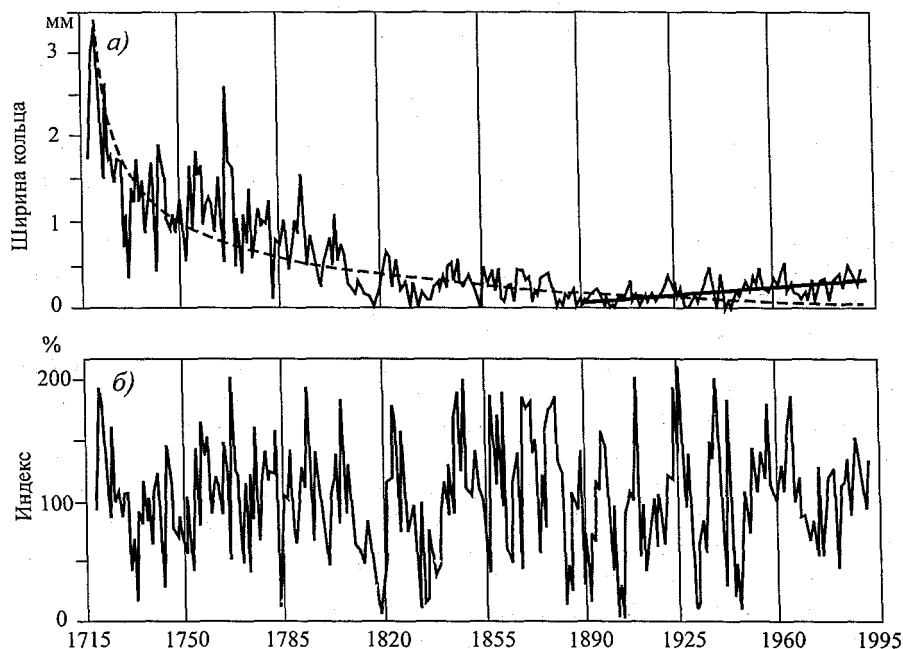


Рис. 5. Ряд ширины годовых колец *JAHO81* (Ваганов и др., 1996, см. рис. 2 а и б) (а); то же после устранения возрастного тренда (б).

Добавлены: линейный тренд ширины колец за 1891—1992 гг. и аппроксимация ширины колец кривой вида $(at + b)^{-1/2}$ на рисунке (а).

адекватную модель возрастных изменений ширины годовых колец, а лишь указать на вероятный недостаток методики, приводящий к потере важной климатической информации (аналогичные потери возможны и на других участках ряда).

В связи с этим стоит указать еще на одну особенность процедуры индексирования ширины годовых колец: так называемое выбеливание, которое состоит в удалении из временных рядов компонент, порожденных процессами авторегрессии, — скользящего среднего (фактически, как следует из табл. 6 книги (Ваганов и др., 1996), использовались только модели авторегрессии). Авторы обосновывают эту процедуру наличием в рядах автокорреляции в силу физиологических причин. Это, конечно, возможно; но при этом следует учитывать, что долгопериодные колебания климата по характеру также могут быть близки к „красному шуму”, порождаясь за счет интегрирования океаном с его огромной тепловой инерцией короткопериодных атмосферных флуктуаций (Hasselmann, 1976), и, таким образом, легко наряду с „физиологическими” колебаниями могут быть исключены и интересующие нас климатические вариации. С другой стороны, это показывает, что выделенные нами в рядах хронологий колебания климата не могут быть объяснены „стохастической концепцией” Хассельмана, что полезно знать при дальнейшем исследовании их природы.

Заключение

Анализ спектральных свойств древесно-кольцевых хронологий в регионе Полярного Урала — Обской губы позволил выявить во временных рядах вариации с характерными масштабами, соответствующими основным модам изменчивости североатлантического колебания: около 60—70 лет, что подтверждает предыдущие результаты разных групп исследователей. Кроме того, что важно как для исследований климатической изменчивости в целом, так и для вопроса о том, до какой степени климатическая изменчивость воспроизводится древесно-кольцевыми хронологиями, в них выражены значительно более короткопериодные моды с периодами около 17 и 23 лет, а также двойной пик около 10 лет. Так же, как и в рядах наблюдений температуры и индексов САК, интенсивность указанных колебаний существенно изменяется во времени. Важна также в целом более слабая региональная мода около 40 лет: в отдельные периоды она становится весьма интенсивной, в том числе в XX в., когда в рядах температуры в рассматриваемом регионе она маскирует основное 60—70-летнее колебание. С другой стороны, есть основания полагать, что методика обработки данных (исключение возрастного тренда годового радиального прироста) исключает долговременные (порядка 100 лет) изменения. Так, почти во всех рассмотренных хронологиях отсутствует 100-летний тренд, характерный для региональной летней температуры воздуха. По-видимому, специалистам следует вновь рассмотреть вопросы

обработки данных при получении индексов, использующихся для построения климатических реконструкций.

Следующим шагом в этом круге исследований является анализ пространственной структуры колебаний, т. е. распределение амплитудных и фазовых характеристик, в данном случае вдоль круга широты. С другой стороны, долгопериодная изменчивость *средних* климатических условий — отнюдь не единственный важный вопрос, где для надежных выводов явно недостаточно длины имеющихся рядов инструментальных наблюдений. Может быть, даже более важно иметь возможность анализировать длинные ряды для оценки изменений повторяемости и интенсивности климатических экстремумов, редких по определению, при долгопериодных изменениях среднего состояния; в частности, это важно для оценки возможных изменений экстремумов при современном потеплении. Это также одна из перспектив работы в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардин М. Ю. 2002. Изменчивость температуры воздуха над западными территориями России и странами ближнего зарубежья в XX в. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 5—23.
- Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. 1996. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. — Новосибирск: „Наука”. — 246 с.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я. 2004. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. — Метеорология и гидрология, № 4, с. 50—66.
- Даценко Н. М., Сонечкин Д. М., Шабалова М. В. 2000. Сезонные различия в длинных рядах температуры воздуха в Европе. — Метеорология и гидрология, № 7, с. 33—45.
- Полонский А. Б., Башарин Д. В., Воскресенская Е. Н., Ворли С. 2004. Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии. — Морской гидрофизический журнал, № 26, с. 42—59.
- Bardin M. 2003. Decadal NAO-induced variability in Eastern Europe and its amplification with the recent warming. — International Ocean Institute. 30th Pacem in Maribus: International Conference. October 27—30, 2003, Kiev, Ukraine. Abstracts Book, p. 85.
- CLIVAR Initial Implementation Plan. — WCRP No.103, WMO/TD No.869, ICPO No. 14, 1998, 314 p.
- Cook E. R., D'Arrigo R. D., Briffa K. R. 1998. A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe. — The Holocene, 8, p. 9—17.
- Deser C., Blackmon M. L. 1993. Surface climate variations over the North Atlantic Ocean during winter 1900—1989. — J. Climate, v. 6, p. 1743—1760.
- Deser C., Walsh J. E., Timlin M. S. 2000. Arctic sea ice variability in the context of recent wintertime atmospheric circulation trends. — J. Climate, 13, p. 617—633.
- Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models. Part I: Theory. — Tellus, 28, p. 473—485.
- Hurrell J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. — Science, 269, p. 676—679.
- Mann M. E., Park J., Bradley R. S. 1995. Global interdecadal and century-scale climate oscillations during the past five centuries. — Nature, 378, p. 266—270.

McPhee M. G., Stanton T. P., Morison J. H., Martinson D. G. 1998. Freshening of the upper ocean in the Arctic: Is perennial sea-ice disappearing? — *Geophys. Res. Lett.*, 25, p. 1729—1732.

Schlesinger M. E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65—70 years. — *Nature*, 367, p. 723—726.

Schlesinger M. E., Ramankutty N. 1995. Is the recently reported 65—70 year surface-temperature oscillation the result of climatic noise? — *J. Geophys. Res.*, 100, p. 13.767—13.774.

Timmermann A., Latif M., Voss R., Grotzner A. 1998. Northern Hemisphere interdecadal variability: a coupled air-sea mode. — *J. Climate*, 11, p. 1906—1931.

Torrence C., Compo G. 1998. A practical guide to wavelet analysis. — *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, p. 61—78.

Vautard R., Ghil M. 1989. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. — *Physica*, 35(D), p. 395—424.

Webster P. J., Magana V. O., Palmer T. N. et al. 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. — *J. Geophys. Res.*, 103, p. 14.451—14.510.

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА ОЗЕРА БАЙКАЛ И ВЛИЯНИЯ НА НЕГО ИЗМЕНЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

М. В. Гальперин¹, М. А. Софиев²

¹ РФ, 121165 Москва, Студенческая ул., 38 — 31, <galperin@rdm.ru>

² Финляндия, FIN-0000880, Sahaajankatu 20E, Хельсинки, Финский метеорологический институт, <mikhail.sofiev@fini.fi>

Реферат. Предлагается динамическая модель водного режима озера Байкал и прилегающего к нему региона. Модель представляет собой систему 12 нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменения во времени водозапаса в озере и на территории его водосбора. Путем модельных экспериментов рассчитываются возможные последствия для озера Байкал различных климатических изменений, в частности изменения количества осадков, интенсивности испарения и времени установления и таяния снежного покрова. Оцениваются как характеристики равновесных режимов, так и временные характеристики переходных процессов, возникающих вследствие дрейфа указанных параметров. Оценки сделаны при различных предположениях об изменениях указанных факторов на протяжении ближайших сотен лет.

Ключевые слова. Водный баланс, водосбор, долгопериодное моделирование, переходный процесс, установление равновесия.

AN EXPERIENCE OF MODELLING THE WATER REGIME OF LAKE BAIKAL AND THE INFLUENCE OF LOCAL CLIMATIC CONDITIONS ON IT

M. V. Galperin¹, M. A. Sofiev²

¹ 38 — 31, Studencheskaya str., 121165 Moscow, Russia, <galperin@rdm.ru>

² Finnish Meteorological Institute, FIN-0000880, Sahaajankatu 20E, Helsinki, Finland, <mikhail.sofiev@fini.fi>

Abstract. A dynamic model for the water budget of Lake Baikal and the adjacent region is proposed. The model is designed as a system of 12 non-linear differential equations describing temporal variations of the water amount in the lake and in its watershed. Possible consequences of climate changes for the lake water budget were evaluated through model experiments. In particular, the variations considered were driven by changes in the amount of precipitation, evaporation intensity, and time of setting and melting of the snow cover. Both climate-caused changes in the parameters of the equilibrium regime and temporal

characteristics of transition processes were quantified. The estimates are made under several assumptions for the changes for the next centuries.

Keywords. Water budget, watershed, long-time modelling, transient process, establishment of equilibrium

Введение

Байкал представляет собой уникальное месторождение чистой пресной воды — минерала, мировые запасы которого истощаются наиболее быстро под антропогенным воздействием. Современный водный баланс Байкала оценивался в целом ряде подробных исследований, основанных на обширных гидрологических и метеорологических данных (Афанасьев, 1959; Афанасьев, 1976; Викулина, Кашинова, 1973; Гронская, Литова, 1991; Цетлин, 1959). Наметившиеся тенденции глобальных изменений климата способны так или иначе повлиять на систему Байкала и его водосбора. Соответственно могут значительно измениться как водозапас озера, так и его гидрологический режим. В связи с этим возникает вопрос о реакции всей системы Байкал — водосбор на климатический дрейф. В данной работе не рассматриваются сценарии климатических изменений (прежде всего в силу их неопределенности), а сделана попытка оценить чувствительность системы к изменениям режима осадков, испаряемости и времени установления и таяния снежного покрова и оценить характерное время реакции системы на эти изменения.

Для исследования использовалась динамическая модель водного режима Байкала и прилегающих к нему территорий. Эта модель была разработана как часть модели распространения стойких органических загрязняющих веществ в этом регионе (Sofiev et al., 2003). Модель предназначена для оценки водных потоков и объемов водных масс как в самом озере и его отдельных бассейнах, так и на территории водосбора озера и состыкована с моделями воздушного переноса и накопления поллютантов в почвах и растительности. Стыковка с моделью воздушного переноса потребовала выбора достаточно малого шага по времени (1—4 ч). Вместе с тем, ввиду очень больших времен жизни стойких органических соединений (десятки и сотни лет) модель предназначена для расчетов за длительные периоды времени. В совокупности это дало возможность использовать модель не только по ее прямому назначению, но и для ориентировочной оценки влияния возможных изменений упомянутых климатических факторов на водный режим Байкала.

Описание модели

На рис. 1 представлена карта расчетного региона. Сам Байкал делится на три части — акватории: южную, среднюю и северную, — занимающих три котловины, разделяемые островами и относительно мелкими подвод-

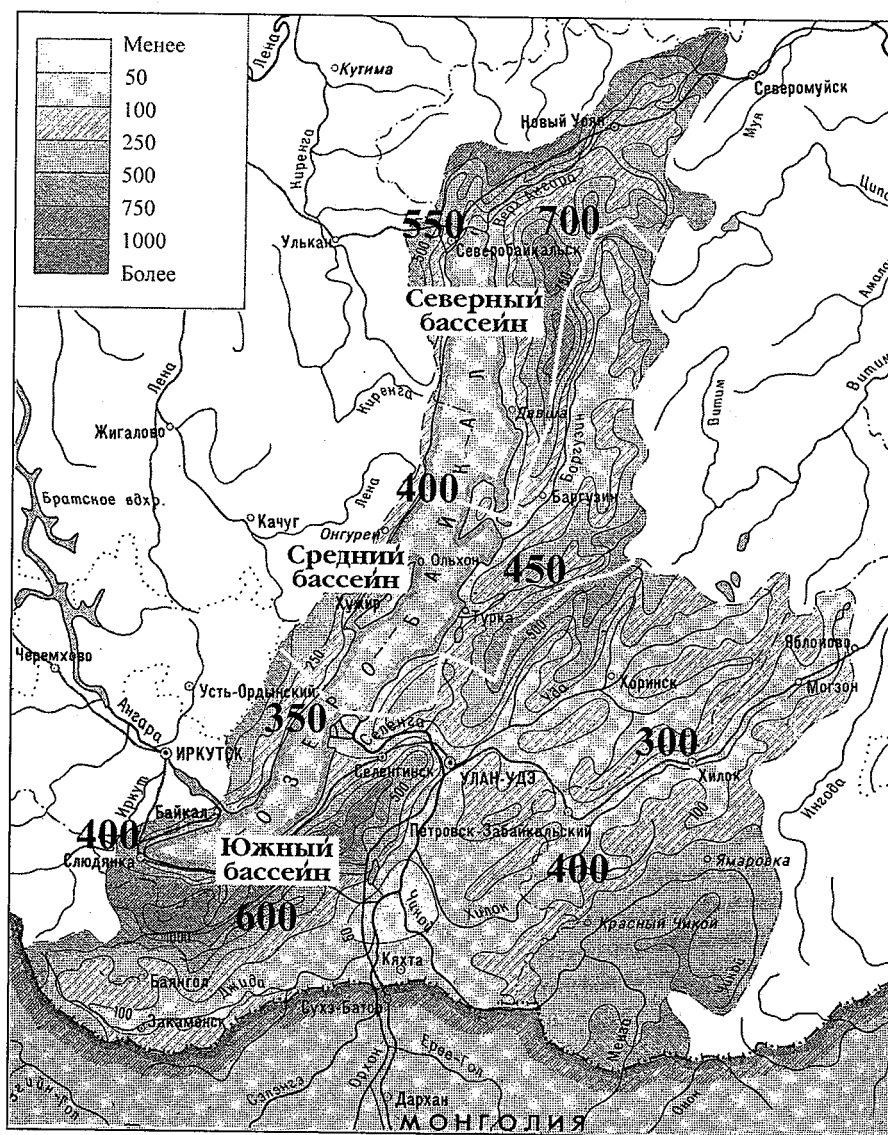


Рис. 1. Карта расчетного региона.
Выделена область основного водосбора.

ными „водоразделами”. Соответственно разделяется и территория водосбора Байкала в зависимости от того, в какую часть озера происходит сток с данной части территории. Границы между бассейнами, образуемыми акваториями и их водосборами, показаны белыми линиями. На карте приведены распределение годовых норм стока (мм) и даны некоторые характерные значения осадков (мм).

Извне в расчетный регион и, следовательно, в озеро воды поступают из верховьев Верхней Ангары (в северный бассейн) и верховьев Селенги (в южный бассейн).

В основу модели положена система из 12 нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменения во времени водозапаса в котловинах и на примыкающих к ним территориях водосбора, а также соответствующих мощностей снежного покрова.

Три уравнения для водозапаса территорий однотипны:

$$dQ_i(t)/dt = -[\beta_i(t) + \alpha_i(t)]Q_i(t) + P_{RLi}(t)S_{Li} + R_{Li}(t)\gamma_L(t), \quad (1)$$

где Q_i — водозапас в почвах и на поверхности i -й территории ($i=1$ — южная часть региона, $i=2$ — средняя и $i=3$ — северная) в момент времени t , $\beta_i(t)$ — коэффициент стока с i -й территории, $\alpha_i(t)$ — коэффициент испарения, S_{Li} — площадь территории, $P_{RLi}(t)$ — осадки в виде дождя, $R_{Li}(t)$ — запасы влаги в виде снега, $\gamma_L(t)$ — коэффициент состояния снежного покрова на территориях. Функции $\beta_i(t)$, $\alpha_i(t)$, $P_{RLi}(t)$ и $\gamma_L(t)$ — периодические, с годовым периодом.

Коэффициент $\gamma_L(t)$ не равен нулю только в течение месяца снеготаяния (в норме — апреля). Предполагается, что в течение этого месяца снег сходит полностью. В течение зимних месяцев принято, что $\gamma_L(t) = 0$, т. е. оттепели во внимание не принимаются. В модели не делается различия между поверхностным и подземным стоком, так как с точки зрения водного баланса самого озера это различие не играет роли.

Три уравнения для объемов воды в котловинах озера записываются в виде:

$$dW_1/dt = \beta_1(t)Q_1 - \lambda_{12}W_1 + \lambda_{21}W_2 + [P_{RW1}(t) - E(t)]S_{W1}\eta_1(t) + R_{W1}\gamma_W(t) + U_1(t) - F; \quad (2)$$

$$dW_2/dt = \beta_2(t)Q_2 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})W_2 + \lambda_{12}W_1 + \lambda_{32}W_3 + [P_{RW2}(t) - E(t)]S_{W2}\eta_2(t) + R_{W2}\gamma_W(t); \quad (3)$$

$$dW_3/dt = \beta_3(t)Q_3 - \lambda_{32}W_3 + \lambda_{23}W_2 + [P_{RW3}(t) - E(t)]S_{W3}\eta_3(t) + R_{W3}\gamma_W(t) + U_2(t), \quad (4)$$

где W_i — объем воды в i -й котловине; λ — коэффициенты стока—оттока вод между акваториями, у которых первый индекс указывает аквато-

рию — источник, а второй — акваторию — приемник; $P_{RWi}(t)$ — осадки в виде дождя и снега, выпавшие на свободную ото льда поверхность; $E(t)$ — испарение с единичной площади; S_{W1}, S_{W2} и S_{W3} — площади акваторий; $\eta_i(t)$ — доля свободной ото льда поверхности i -й акватории; $R_{Wi}(t)$ — запасы влаги в виде снега на покрытой льдом поверхности; γ_W — коэффициент состояния снежно-ледяного покрова на акваториях; $U_1(t)$ и $U_2(t)$ — стоки с верховьев Селенги и Верхней Ангары соответственно; F — сток (расход) из южной котловины в Ангару.

Уравнения для снежного покрова, образованного осадками, имеют вид:

$$dR_{Li}(t)/dt = P_{SLi}(t)S_{Li} - R_{Li}(t)\gamma_L(t); \quad (5)$$

$$dR_{Wi}(t)/dt = P_{SWi}(t)S_{Wi}[1 - \eta_i(t)] - R_{Wi}(t)\gamma_W(t), \quad (6)$$

где $P_{SLi}(t)$ и $P_{SWi}(t)$ — осадки в виде снега на суше и акваториях соответственно, функции $\eta_i(t)$ — периодические с периодом в год.

Площади S , сток Ангары и коэффициенты λ в уравнениях (1)–(6) в свою очередь являются функциями уровня воды в озере или отдельных его частях. При современном состоянии озера этот уровень стремится к выравниванию по среднеклиматической отметке, но при сильном уменьшении объемов вод скорость выравнивания неизбежно уменьшается и озеро может распасться на два или даже три отдельных водоема. Для расчетов уровней использовалась аппроксимация соотношения между объемом воды в котловине и глубиной ее заполнения:

$$W = \nu h^{\xi+1}/(\xi + 1), \quad (7)$$

где ν и ξ — параметры формы котловины, $h(t)$ — глубина ее заполнения. Понятно, что параметры ν и ξ свои у каждой котловины. Соответственно площадь акватории котловины есть

$$S_W = \partial W / \partial h = \nu h^{\xi}. \quad (8)$$

Уравнение баланса площадей имеет вид

$$S_{Wi} + S_{Li} = \text{const}. \quad (9)$$

При программировании задачи, а также с точки зрения наглядности результатов удобно за нулевой принимать современный равновесный уровень воды. В этом случае

$$h_i = h_{\max i} + H_i, \quad (10)$$

где $h_{\max i}$ — современная максимальная глубина воды в i -й котловине и H_i — текущий средний уровень воды в котловине, отсчитываемый от со-

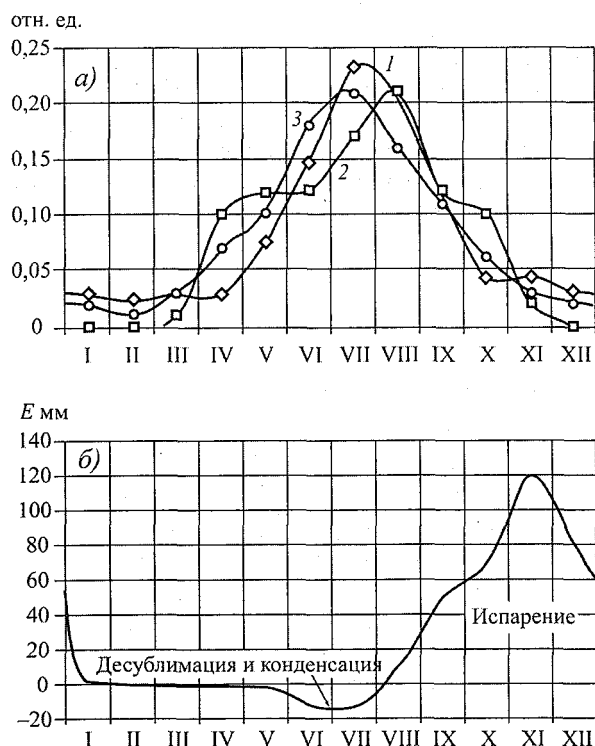


Рис. 2. Годовой ход основных входных воздействий на водный баланс.

a — осадки (1), испарение с суши (2) и сток с водосбора (3); *б* — испарение с поверхности Байкала.

временного нулевого уровня. Средний уровень воды во всем озере будет обозначаться H без индекса.

Исходные данные для получения численных значений коэффициентов модели были взяты из работ (Афанасьев, 1976; Байкал (атлас), 1993). Годовой ход выпадения осадков, испарения и стока с верховьев Селенги и Верхней Ангары показан на

рис. 2. Незначительные различия в неравномерности осадков и испарения между отдельными частями расчетного региона не учитываются.

Тестирование модели и результаты моделирования

Для предварительного тестирования модель была запущена при произвольных, но близких к современным начальных условиях по водозапасах $Q_i(0)$ и $W_i(0)$ и при современных уровнях осадков, испарения, условиях снегонакопления и снеготаяния. После свободного переходного процесса модель выходила на установившийся режим, соответствующий современному состоянию всей системы. В этом режиме основные переменные совершают только небольшие осцилляции вокруг среднегодовых уровней. Эти осцилляции обусловлены внутригодовой неравномерностью метеопараметров.

Вычисленные равновесные характеристики Байкала сравнивались с известными из литературы оценками их реальных значений (Верболов, 1975; Верболов, 1978). Результаты этого сравнения приведены ниже:

Объем воды северного бассейна, км ³	7020	7018
Объем воды среднего бассейна, км ³	9200	9198
Объем воды южного бассейна, км ³	5447	5449
Площадь озера, км ²	31 500	31 505
Сток в Ангара, км ³ /год	60,1	60,19
Сток из северного бассейна в средний, км ³ /год. . .	13,9	14,98
Сток из среднего бассейна в южный, км ³ /год	36,2	38,24

Более „тонкой” оценкой качества модели и исходных данных было сравнение модельного годового хода уровня воды с измеренным (Байкал (атлас), 1993). Результаты этого сравнения приведены на рис. 3.

Из приведенных выше данных, а также из рис. 3 видно, что модель вполне удовлетворительно описывает водный баланс Байкала в его современном состоянии.

Полезным дополнительным результатом предварительного тестирования было получение равновесных значений водозапаса Q_i , которые впоследствии использовались в качестве начальных условий $Q_i(0)$ при модельных экспериментах. Это позволило решить проблему, связанную с согласованием начальных условий, и избежать их некорректного задания.

Для проверки модели при больших отклонениях от равновесия была решена задача о заполнении котловин Байкала. Были заданы нулевые начальные условия по запасам воды в самом Байкале $W_i(0) = 0$ и равновесные начальные условия для водосборов $Q_i(0)$. При современных метеопараметрах модель в свободном движении выходила на современное равновесное состояние. На графиках рис. 4 можно ясно выделить четыре особых точки. До точки А три бассейна Байкала разделены и заполняются независимо друг от друга. Далее избыток воды из северной котловины начинает поступать в среднюю котловину, и при этом объем и уровень воды в северной котловине не меняются до тех пор, пока уровни в этих котловинах не сравняются (точка В). С этого момента Байкал разделен на два бассейна. Южный бассейн заполняется гораздо быстрее северного, так как приток в

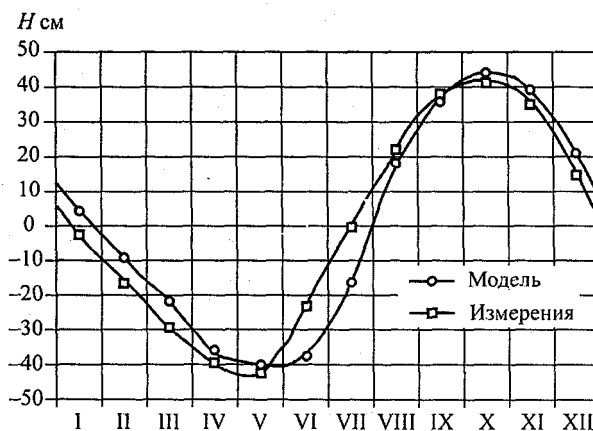


Рис. 3. Годовой ход уровня воды в Байкале.

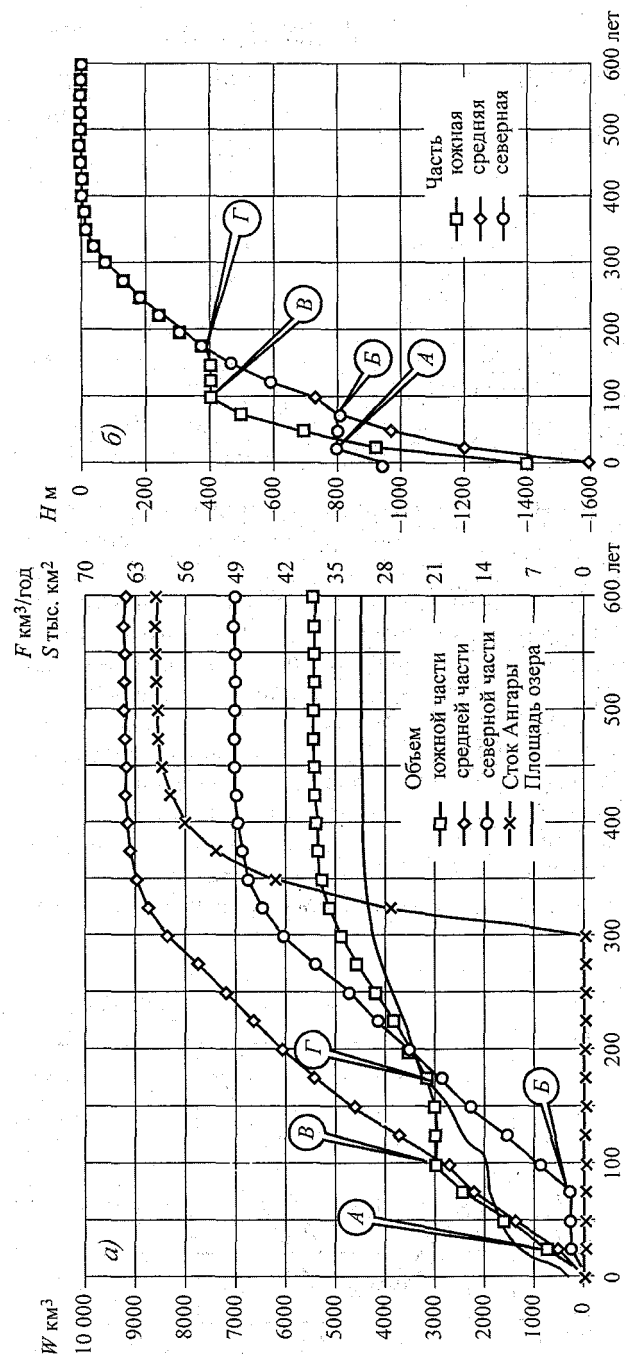


Рис. 4. Модельный расчет заполнения котловины Байкала при современных климатических условиях.
 а — объемы (W) воды (водозапасы), сток (F) Ангары и площадь (S) озера; б — уровни (H) воды.

него больше, а объем его котловины меньше. В точке *B* вода из южного бассейна начинает перетекать в среднюю часть озера и примерно через 70 лет все бассейны сливаются в один (точка *Г*). Сток воды в Ангару начинается еще спустя примерно 130 лет, и к 450-му году от начала заполнения характеристики системы выходят на равновесные уровни, близкие к современным. Данная задача, будучи чисто умозрительной и имеющей слабое отношение к современному состоянию системы (за исключением, быть может, последних 50—100 лет), тем не менее дает возможность оценить максимальное время установления современного равновесного состояния системы и показать, что модель выходит на это состояние.

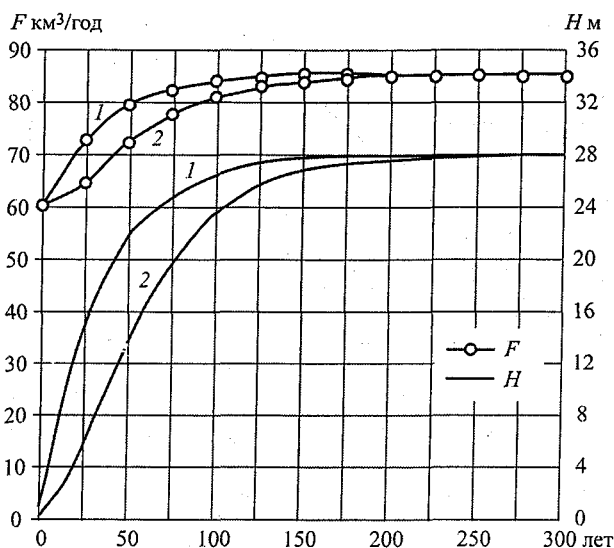
На характеристики Байкала непосредственно могут воздействовать уровень осадков, интенсивность испарения и изменения сроков установления и таяния снежно-ледяного покрова. Модельные эксперименты, которые будут описаны ниже, имели основной целью оценить влияние этих параметров. В модели учтен ряд нелинейных связей в системе: H_i связаны с W_i через соотношения (7) и (10), а площади S , сток Ангары F и коэффициенты λ в уравнениях (1) — (6) есть функции H_i . Дополнительной целью было выяснить, насколько система Байкала близка к линейной при сравнительно небольших отклонениях от современного равновесия.

Второй вопрос, связанный с проблемой изменений климатических факторов, — какова скорость реакции системы на эти изменения.

В серии модельных экспериментов в качестве начальных условий задавались современные равновесные значения $W_i(0) = 0$ и $Q_i(0)$. В каждом эксперименте все факторы брались также на современном уровне, за исключением того одного, влияние которого исследовалось. Далее осуществлялся прогон модели за срок, при котором система выходила на новый равновесный уровень. Примеры представлены на рис. 5. Здесь показаны результаты численных экспериментов при скачкообразном возрастании нормы осадков.

Рис. 5. Переходные процессы уровня (H) и стока (F) Ангары при изменении нормы осадков.

Кривые 1 и 2 — см. объяснения в тексте.



тании уровня осадков при $t = 0$ в 1,4 раза (кривые 1) и при плавном росте их годовых сумм (кривые 2) по закону

$$P(t)/P_0 = 1,4 - 0,4 \exp(-t/T),$$

где P_0 — современная норма осадков и постоянная времени $T = 50$ годам.

На рис. 6 показаны зависимости установившихся характеристик системы от изменений количества осадков и уровня испарения по сравнению с

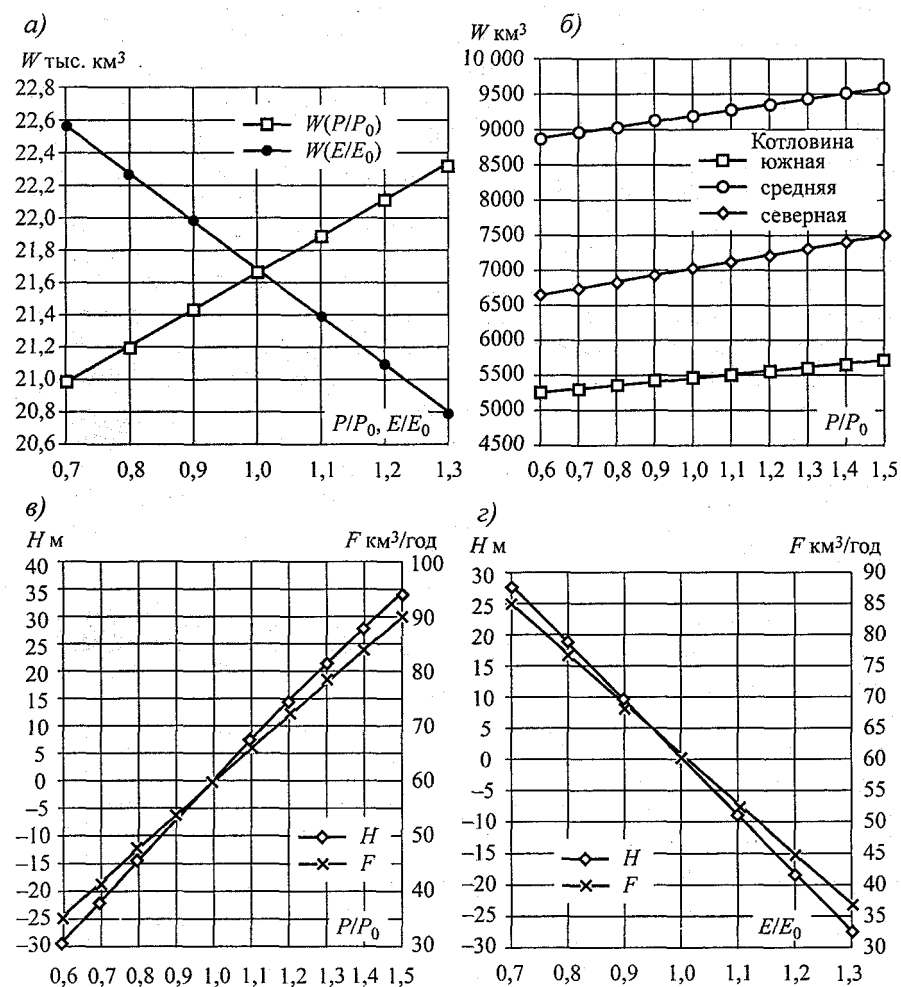


Рис. 6. Зависимости равновесных характеристик Байкала от норм осадков (P_0) и испарения (E_0) (современные нормы).

а — равновесный запас воды в озере в целом как функция P/P_0 и E/E_0 ; б — запасы воды в отдельных котловинах как функции P/P_0 ; в, г — средний уровень воды и стока Ангары как функции P/P_0 и E/E_0 соответственно.

их современными значениями P_0 и E_0 . Из графиков видно, что в широких пределах систему можно считать практически линейной относительно этих климатических изменений. Существенно, что относительные изменения уровня испарения влияют на режим системы несколько сильнее, чем количество осадков. Было показано, что эти факторы влияют на водный баланс аддитивно.

Для того чтобы оценить влияние перераспределения осадков внутри года были осуществлены прогоны модели для двух ситуаций. Во-первых, для случая, когда осадки выпадают абсолютно равномерно в течение года. Во-вторых, для ситуации, „инверсной” по отношению к нынешней, когда 80 % осадков выпадает в зимние, а не в летние месяцы. Оказалось, что такие сдвиги выпадения осадков в сторону зимы ведут к снижению среднего уровня в озере на 2,5 и 5,5 м соответственно и к снижению стока Ангары до 57,7 и 55,2 км³/год соответственно.

На рис. 7 показана полученная модельная зависимость установившегося среднего уровня воды в Байкале от средней продолжительности сохранения устойчивого снежного покрова. Эта зависимость несколько отличается от линейной, но характер этой нелинейности может в большой степени зависеть от сделанных при построении модели упрощений.

Графики роста и спада уровня воды и водозапаса типа кривых 1 на рис. 5 можно аппроксимировать зависимостями, характерными для линейных систем 1-го порядка. Например, переходный процесс изменения уровня при скачкообразном изменении количества осадков или испарения можно аппроксимировать простой функцией

$$H(t) = H_{\infty} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (11)$$

где начальный уровень принят за нуль, H_{∞} — асимптотическое значение

$H(t)$, приближенно равное конечному равновесному уровню, и τ — постоянная времени системы. Многочисленные прогоны модели показали, что величина τ практически не зависит от характера воздействия и его амплитуды в широком диапазоне. Это подтверждает, что система вблизи современного рав-

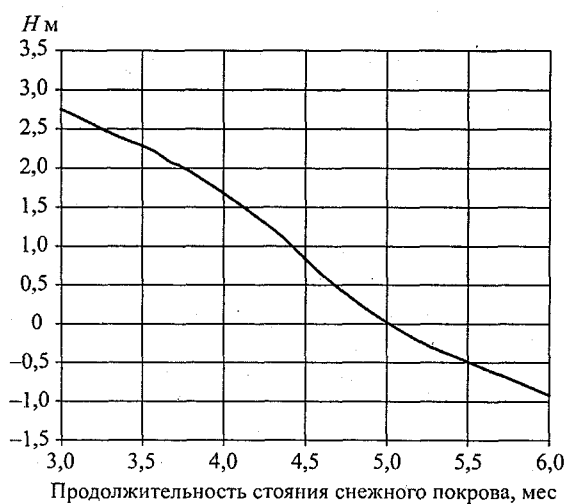


Рис. 7. Зависимость уровня воды от продолжительности стояния снежного покрова.

новесия ведет себя как линейная система первого порядка. Оценка по переходным процессам дает значение τ около 30 лет.

Для более точной оценки τ был использован косвенный метод. Если на подобную систему оказывается гармоническое воздействие, круговая частота которого ω существенно выше, чем $1/\tau$, то имеет место приближенное соотношение

$$t \cong K(0)/\omega K(\omega), \quad (12)$$

где $K(0)$ — коэффициент передачи возмущения в системе при $\omega \rightarrow 0$, $K(\omega)$ — коэффициент передачи на частоте ω . Уровень воды в Байкале регулярно колеблется с периодом, равным половине основного солнечного цикла, т. е. с периодом 5,5 лет (Афанасьев, 1976; Байкал (атлас), 1993). Этому периоду соответствует $\omega = 1,1424 \text{ год}^{-1}$. При прочих современных равновесных условиях в модели были заданы колебания годовых норм осадков с периодом 5,5 лет и амплитудой, равной 0,3 средней многолетней нормы, примерно воссоздающие упомянутый эффект. Результат показан на рис. 8. Значение $K(0)$ можно получить из графика на рис. 6 в. После простейшего расчета

имеем уточненную оценку $\tau \cong 35,9$ года. Отметим, что, как и следовало ожидать, фазовое запаздывание реакции системы на частоте $\omega = 1,1424 \text{ год}^{-1}$ приближается к $\pi/2$.

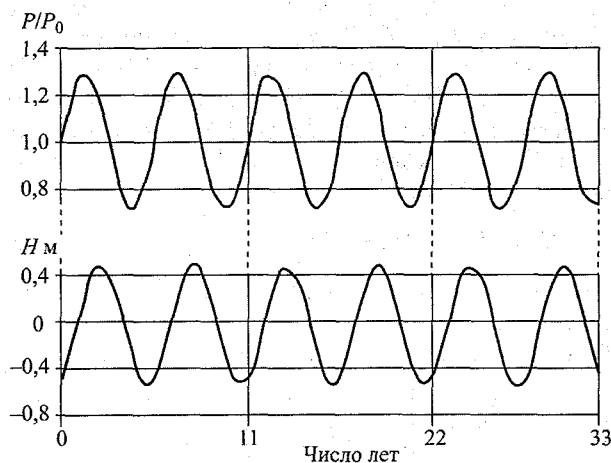


Рис. 8. Реакция среднегодового уровня воды на колебания годового количества осадков.

Обсуждение

При построении моделей такого назначения, как описываемая здесь, возможны два подхода. Во-первых, подход, основанный на составлении баланса потоков в равновесной системе. Именно подобный подход в разных формах использовался в работах (Викулина, Кашинова, 1973; Цетлин, 1959). В этом случае при заданных условиях предполагается равенство нулю всех производных по времени, и, таким образом, задача сводится к решению системы алгебраических уравнений. Во-вторых, подход, применяемый в настоящей работе и основанный на решении системы дифференциальных уравнений.

Первый, „статический” подход кажется проще, но при его использовании возникает целый ряд трудностей, связанных с плохой обусловленностью системы. Несогласованность исходных значений переменных (начальных условий), мгновенно выявляемая в динамической модели, остается незамеченной. В результате, даже при преодолении проблемы плохой обусловленности системы, „статический” подход может приводить к неприемлемым ошибкам, которые трудно, а то и невозможно выявить в рамках самого подхода. Вторым недостатком балансовой модели — трудность достаточно достоверной оценки формы и постоянных времени переходных процессов в исследуемой системе и других ее динамических характеристик. Именно по этим причинам в данной работе был избран второй, „динамический” подход, свободный от указанных недостатков. Он, конечно, требует гораздо больших компьютерных ресурсов, но эта проблема легко разрешима в наше время. Один численный эксперимент на вышеописанной модели (запрограммированной на ФОРТРАНЕ) продолжительностью 1000 лет занимает на современной рабочей станции не более полу-минуты.

При построении модели был сделан ряд упрощающих и отчасти даже произвольных допущений, что практически неизбежно при исследованиях многомерных систем с большим числом обратных связей, зачастую плохо изученных. Результаты сравнения с измерениями современного состояния водного баланса Байкала и исследование чувствительности системы к ряду наименее исследованных параметров показали: погрешности оценок объемов и потоков современного водного баланса лежат в пределах 2 % и только по временным параметрам достигают 10—20 %, что можно считать приемлемым.

В то же время, при сильном отклонении климатических параметров от современных значений, величины соответствующих коэффициентов будут меняться, причем, скорее всего, нелинейно по отношению к интенсивности возмущения. Поскольку данные эффекты в модели не учтены, ее применение для подобных сценариев требует дополнительного изучения возникающих ошибок.

Целый ряд вопросов, влияющих на современное состояние водного баланса, остался за пределами данного исследования. Так, в модели никак не учитывается зарегулированность стока через Ангара и предполагается, что он зависит только от уровня воды в Байкале. Достаточно грубо и общо аппроксимируется орография дна и берегов. В модели не учитывается обратное влияние Байкала на климатические условия окружающих территорий.

Модель, тем не менее, дает количественные оценки ряда параметров, позволяющие в первом приближении представить влияние климатического дрейфа на режим Байкала при ограниченной мощности исследуемых возмущений.

Безусловно, для полного исследования вопроса потребуется разработка гораздо более подробных моделей, состыкованных с глобальными климатологическими моделями и локальными моделями обмена между средами — воздушной, почвенной и водной.

Благодарности

Авторы признательны Е. Н. Тарасовой за подробные и полезные консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (проект 00140).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев А. Н. 1959. Водный баланс озера Байкал. — В кн.: Труды 3-го Всесоюзного гидрологического съезда. — Л.: Гидрометеиздат, т. 4, с. 174—183.

Афанасьев А. Н. 1976. Водные ресурсы и водный баланс оз. Байкал. — Труды лимнологического института, т. 25 (45). — Новосибирск: Наука, СО. — 240 с.

Байкал (атлас) 1993. — М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, РАН СО. — 160 с.

Верболов В. И. 1975. Течения и водообмен в Байкале. — В кн.: Гидрология озер и водохранилищ. — М.: Изд-во МГУ, ч. 1, с. 112—128.

Верболов В. И. 1978. Динамика вод. — В кн.: Проблемы Байкала. — Труды лимнологического института, т. 16 (36). — Новосибирск: Наука, СО, с. 87—102.

Викулина З. А., Кашинова Т. Д. 1973. Водный баланс оз. Байкал. — В кн.: Труды Государственного всесоюзного гидрологического института. — Л.: Гидрометеиздат, вып. 203, с. 3—33.

Гронская Т. П., Литова Т. Е. 1991. Короткие характеристики водного баланса оз. Байкал в течение 1962—1988. — В кн.: Мониторинг оз. Байкал. — Л.: Гидрометеиздат, с. 153—158.

Цетлин В. С. 1959. Водный баланс оз. Байкал. — В кн.: Труды 3-го Всесоюзного гидрологического съезда. — Л.: Гидрометеиздат, т. 4, с. 184—191.

Sofiev M., McLachlan M. S., Maslyayev A., Wania F., Galperin M. 2003. On modelling the pollution of the Lake Baikal region with polychlorinated biphenyls. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — СПб.: Гидрометеиздат, т. 19, с. 39—57.

МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОПУСТЫНИВАНИЯ

А. Н. Золотокрылин

РФ, 109017 Москва, Старомонетный пер., д. 29, Институт географии, zgoldfinch@mtu-net.ru

Реферат. Предлагается гипотеза, раскрывающая природу и закономерности распространения климатического опустынивания. Согласно гипотезе, климатическое опустынивание есть результат взаимодействия региональных процессов аридизации и деградации засушливых земель в климатической системе с положительной и отрицательной обратными связями альbedo—осадки. Климатическое опустынивание поддерживается положительной обратной связью, когда доминирует радиационное регулирование температуры подстилающей поверхности. Внешним регулятором положительной обратной связи выступают изменения суммы осадков и повторяемости экстремальных осадков (особенно засух). Показано, что опустынивание определяется не только снижением количества осадков, но также уменьшением повторяемости осадков. В последние десятилетия возрастает значение антропогенной деградации засушливых земель как дополнительного регулятора положительной обратной связи.

Распространению положительной обратной связи препятствует отрицательная обратная связь в случае доминирования эвапотранспирационного регулирования температуры поверхности. Переключение положительной обратной связи на отрицательную определяется изменением теплообмена между земной поверхностью и атмосферой, в котором существенно возрастает поток явного тепла. Это происходит в случае одновременного повышения альbedo и температуры поверхности. Определено пороговое значение зеленой фитомассы и ее NDVI-индикатора, ниже которого отрицательная обратная связь переключается на положительную. Антропогенная деградация растительности ускоряет достижение порогового значения фитомассы и, следовательно, распространение климатического опустынивания.

Область с доминированием климатического опустынивания — территория, где в большинстве случаев зеленая фитомасса в сезонном и межгодовом ходе достигает порогового значения. Как правило, область включает часть аридных земель и семиаридные земли в случае слабой антропогенной деградации растительного покрова. Но иногда область расширяется за счет деградированных в результате деятельности человека сухих субгумидных земель. Анализируются новые результаты мониторинга климатического опустынивания с помощью NDVI-индикатора в Северо-Туранской области, в Монголии, а также в Сахельской зоне в 1982—2001 гг. в условиях глобального потепления и антропогенной деградации земель.

Ключевые слова. Опустынивание, аридизация, деградация земель, обратные связи, альbedo, температура поверхности, осадки, NDVI-индикатор, засушливые регионы.

MONITORING OF CLIMATE-RELATED COMPONENT OF DESERTIFICATION

A. N. Zolotokrylin

Institute of Geography, 29, Staromonetny, 109017 Moscow, Russia, zgoldfinch@mtu-net.ru

Abstract. A hypothesis for the climate-related component of desertification that reveals nature and logic of expansion of climate-driven desertification is proposed. According to this hypothesis, climate-related desertification is a result of interaction between regional processes of aridization and degradation of dry lands within the climate system with positive and negative albedo—precipitation feedbacks. Climate-related desertification is maintained by regional climate system feedbacks, if radiative regulation of underlying surface temperature prevails. External regulator of positive feedback is the variation of precipitation amount and frequency of extreme precipitation (especially droughts). It is shown that desertification is predetermined by the decreased precipitation as well as by the decrease in frequency of precipitation. In the second half of 20th century the importance of man-induced degradation of dry lands as additional regulator of positive feedback has been increased.

Usually the expansion of positive feedback is blocked by the negative one related to regulation of surface temperature through evapotranspiration. A switch from positive feedback to the negative one is predetermined by the modification of in the heat exchange between the Earth's surface and the atmosphere which non-latent component increases. The above takes place in case of simultaneous increases in the albedo and surface temperature. Threshold value for green phytomass and its NDVI-indicator beyond which the negative feedback switches to the positive one has been found. Man-induced degradation of vegetation accelerates the approaching of the threshold value of phytomass, and, subsequently, the expansion of climate-related desertification.

An area dominated by climate-related desertification includes territories at which, in most cases, green phytomass attains threshold values in its seasonal and inter-annual variations. As a rule, the range partly includes arid and semiarid lands in case of moderate man-induced degradation of vegetation cover. However, sometimes dry sub-humid lands degraded in result of human activities are also included in the area. First results of monitoring the climate-related desertification and its analysis with the use of NDVI-indicator for the Turan area, Mongolia and the Sahel in 1982—2001 under global warming and man-induced degradation of lands are presented.

Keywords. Desertification, aridization, degradation of lands, feedbacks, albedo, surface temperature, precipitation, NDVI-indicator, dry-land regions.

Введение

Современное опустынивание засушливых земель развивается под влиянием взаимодействующих природных и антропогенных факторов. Первостепенное значение среди них имеет климат, аридизация которого при экстремальных условиях считается начальной фазой опустынивания. Глобальное потепление в конце XX в., которое большинством климатологов объясняется увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения (Climate change, 2001), еще больше повышает интерес к изучению климатического фактора. Хотя большинство глобальных климатических моделей показывают увеличение осадков в тропиках и уменьшение их в субтропиках при росте концентрации парниковых газов в атмосфере, проявление глобального потепления в засушливых регионах не вполне соответствует этим сценариям. Примером может служить засуха в Сахели, которая длится с перерывами уже более 30 лет.

Независимо от климатического фактора опустынивание порождается усиливающейся антропогенной деградацией засушливых земель, в первую очередь растительного покрова. Деградация, вызванная чрезмерной нагрузкой населения на землю, сильно меняет свойства подстилающей поверхности (это альbedo, аэродинамические характеристики, влажность и т. д.) и, следовательно, ее теплообмен с приземной атмосферой. В этом случае возрастает вероятность обратного влияния деградированной поверхности на аридизацию климата.

В данной работе опустынивание рассматривается как результат взаимодействия двух составляющих: аридизации и антропогенной деградации засушливых земель. Изучение проявления этих составляющих — один из ключевых вопросов опустынивания. Ориентиром при его решении может служить дифференциация засушливых земель по степени аридизации климата (климатическое опустынивание) с помощью индикаторов.

Ниже предпринята попытка выделения засушливых земель в нескольких ключевых регионах, в которых климатическое опустынивание имеет преимущественное значение по отношению к антропогенной деградации. Первый из регионов представлен равнинами Средней Азии и сопредельных территорий, второй — это южная половина Монголии, и, наконец, третий регион включает страны Сахели. Основная цель работы — обоснование спутникового индикатора для мониторинга климатического опустынивания.

Особенность данного исследования состоит в том, что проявление климатического опустынивания оценивается в малоинерционных компонентах экосистем (это растительный покров и почва (влагозапасы)), т. е. в

масштабе нескольких десятилетий или жизни одного поколения. С этой точки зрения, климатическое опустынивание характеризуется: 1) обратимой утратой части растительного покрова и 2) деградацией части растительного покрова с низкой способностью к восстановлению в условиях чрезмерной антропогенной нагрузки. В данном определении, с одной стороны, подчеркивается важная природная особенность климатического опустынивания — обратимость процесса, а с другой — учитывается хрупкость равновесия в системе засушливые земли—атмосфера, которое может быть нарушено деятельностью человека по типу положительной обратной связи.

Обоснование индикатора климатического опустынивания базируется на биогеофизической гипотезе положительной обратной связи альbedo—осадки (Charney, 1975). Согласно гипотезе, повышение альbedo поверхности, вызванное в основном антропогенной деградацией растительного покрова, снижает температуру поверхности и далее по цепочке воздействий — количество выпадающих региональных осадков (см. рис. 1). Следует отметить, что годом раньше эту идею на мезомасштабном уровне высказал Otterman (1974), анализируя материалы спутниковых наблюдений за альbedo и температурой поверхности на Синайском полуострове.

Влияние повышения альbedo поверхности на уменьшение осадков было подтверждено рядом численных экспериментов на климатических моделях разной сложности на примере Западной Африки (Charney et al., 1977; Sud, Molod, 1988; Xue, Shukla, 1993; Zhang, Henderson-Sellers, 1996; Zheng, Eltahir, 1997).

Однако анализ накопленных наблюдений за альbedo и температурой поверхности в аридных, семиаридных и субгумидных землях показал, что повышение альbedo не всегда вызывает понижение температуры поверхности, как постулируется в альbedной гипотезе. Оно происходит в основном в аридных и реже в семиаридных землях (Wendler, Eaton, 1983; Золотокрылин, 1986; Seguin et al., 1987). Наблюдения на менее засушливых землях отмечают, как правило, повышение температуры при увеличении альbedo. На это обстоятельство впервые указали Jackson, Idso (1975) и Ripley (1976) при анализе альbedной гипотезы опустынивания Чарни. Позднее Idso (1981) на основании уравнения теплового баланса объяснил повышение температуры поверхности почвы перераспределением затрачиваемого ранее тепла на испарение. Возникновение положительной корреляции между альbedo и температурой описывается также линейной статистической моделью (Avissar, Pielke, 1989).

Замеченное противоречие между наблюдениями и теорией устраняется предположением о переключении положительной обратной связи на сдерживающую опустынивание отрицательную. Если оно верно, то с учетом данных наблюдений возможна новая трактовка гипотезы Чарни как биогеофизической гипотезы опустынивания с обратными связями (Золо-

токрылин, 1986, 2003). Подобный вывод вытекает также из работы Polcher (1995), который исследовал с помощью численных экспериментов на модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) Лаборатории динамической метеорологии (LMD) влияние деградации поверхности в тропиках на осадки. Позднее на примере засушливых земель Западной Африки теоретический и численный анализ показал возможность существования по крайней мере двух региональных климатов (сухого и влажного), поддерживаемых положительной и отрицательной обратными связями (Claussen, 1997, 1998; Wang, Eltahir, 2000; Zeng, Neelin, 2000).

Таким образом, из новой трактовки биогеофизической гипотезы опустынивания вытекает, что распространение климатического опустынивания ограничивается в результате переключения положительной обратной связи на отрицательную. Открытым вопросом остается определение индикатора условий, при котором вероятно это переключение. Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо исследовать изменение связи между альбедо и температурой поверхности в засушливых областях от обратной (радиационный теплообмен) к прямой (эвапотранспирационный). Затем необходимо определить индикатор — пороговое значение вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index — NDVI), — ниже которого преимущественное значение имеет радиационный теплообмен поверхности с атмосферой, и с помощью этого индикатора — выделить области с доминированием климатического опустынивания и оценить тенденции этого процесса в заданных регионах.

Методы и материалы

Обоснование индикатора базируется на собственных и обобщенных по литературным данным результатах наземных, дистанционных, включая спутниковые, наблюдений за характеристиками подстилающей поверхности и климата, продуктивностью экосистем в заданных регионах, на анализе данных метеосети. Дополнительно приводятся полученные разными исследователями теоретические доводы, основанные на численных экспериментах на МОЦА, которые говорят в пользу гипотезы климатического опустынивания.

Сбор материала происходил в два этапа. Цель первого этапа — определение зональных экосистем с оценкой их продуктивности, в которых доминируют соответственно радиационный и эвапотранспирационный типы теплообмена. На этом этапе использованы материалы результатов ежегодных полевых работ климатологического отряда ИГРАН, проводившихся в 1981—1989 гг. Он включает результаты наземных локальных наблюдений в сочетании с дистанционными мезомасштабными наблюдениями с вертолета за альбедо и температурой поверхности. Наземные наблюдения включали градиентные измерения температуры и влажности воздуха, скорости ветра для вычисления потоков явного и скрытого тепла,

измерение составляющих уравнения радиационного баланса в пустынях и полупустынях Средней Азии, Казахстана и Монголии. По данным наблюдений определено соотношение между альбедо и температурой поверхности в разных экосистемах, вычислены аэродинамические параметры подстилающей поверхности, а также составляющие уравнения теплового баланса.

Полевые материалы в Средней Азии и Монголии были дополнены обобщением опубликованных результатов следующих крупных отечественных и международных комплексных экспедиций и экспериментов: Комплексная экспедиция Гидрометеослужбы СССР в Пахта-Арал, Махталинская экспедиция Главной геофизической обсерватории (ГГО) и Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института (САНИГМИ) в 1959 г.; Комплексный энергетический эксперимент КЭНЭКС-70 в Юго-Восточных Каракумах и КЭНЭКС-71 в сухой степи вблизи Уральска; HEIhe river basin Field Experiment (HEIFE) в Северо-Западном Китае в 1989—1993 гг.

Обобщение результатов экспериментов — Dry Tropical Atmospheric Boundary Layer (ECLATS) в 1980 г.; Yantala campaign в Нигере в 1984 г.; The Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel (HAPEX-Sahel) в Западной Сахели в 1991—1992 гг. — легло в основу материалов для стран Сахели. Эти материалы характеризуют пространственное распределение количества и повторяемости осадков разной интенсивности, альбедо и температуры поверхности, составляющие уравнения теплового баланса, наземную фитомассу типичных экосистем.

Материалы данного этапа включают также опубликованные данные о продуктивности экосистем (Бейдеман, 1983; Продуктивность, 1974; Базилевич, 1993; Казанцева, 1986, 1988; Казанцева, Даважамц, 1988; Gillet, 1967; Le Houerou, 1980; Le Houerou, Hoste, 1977; Prince, 1991; Tucker et al., 1985; Tucker, Sellers, 1986). Дополнительно для Центральной Азии определены, а для Западной Сахели использованы опубликованные зависимости продуктивности от годовых осадков, NDVI от продуктивности, NDVI от годовых осадков. Далее эти зависимости применяются для оценки порогового значения NDVI, ниже которого имеет место преимущественно радиационный тип теплообмена.

Второй этап — это сбор спутникового материала на региональном уровне с целью определения индикатора климатического опустынивания. Этап начался в середине 1990-х годов, когда стали доступными многолетние спутниковые наблюдения за характеристиками подстилающей поверхности. Эти материалы включают статистические показатели (среднее и среднеквадратическое отклонение) месячных значений NDVI, альбедо и радиационной температуры поверхности с разрешением 16×16 км за вегетационные сезоны 1985—1992 гг. (Gutman et al., 1997), а также месячные значения NDVI с разрешением $1 \times 1^\circ$ и 8×8 км за вегетационные сезоны 1982—2001 гг. (DAAC...).

Источником месячного NDVI с разрешением $1 \times 1^\circ$ и 8×8 км служит Distributed Active Archive Center (DAAC) Годдардовского центра космических полетов (ГЦКП) США. NDVI-данные получены с помощью усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (УРОВР), установленного на метеорологических спутниках серии НУОА.

Концепция NDVI базируется на разном отражении радиационных потоков растительным покровом в видимом (0,58—0,68 мкм) диапазоне солнечного спектра (K1) и ближнем инфракрасном (0,725—1,10 мкм) диапазоне (K2). Механизм образования хлорофилла и отражения радиации листьями является причиной низкого отражения в K1 и высокого отражения в K2. Отражения в K1 и K2 изменяются в противоположных направлениях, если растительность находится в стрессовом состоянии. Разности между оценками отражения в этих диапазонах с последующей нормировкой на их сумму используется для вычисления NDVI:

$$NDVI = K2 - K1 / K2 + K1.$$

Листья растений обладают сильной поглощательной способностью в диапазоне K1 и сильной отражательной — в диапазоне K2. При увеличении листового индекса отражение растительным покровом радиации в диапазоне K1 уменьшается. В то же время отражение радиации в диапазоне K2 возрастает с увеличением листового индекса. Таким образом, NDVI большинства типов растительного покрова и сельскохозяйственных культур нелинейно возрастает с увеличением листового индекса. Значения NDVI меняются от минимальных значений (0,03—0,05) в экстрааридных пустынях до 0,7—0,8 в лесах экваториальных и умеренных широт.

В аридных регионах с преобладанием многолетних растений отражение в диапазонах K1 и K2 уменьшается по мере увеличения проективного покрытия растительного покрова. Это объясняется тем, что многолетние пустынные растения имеют смесь зеленых и отмирающих листьев, которая интенсивнее отражает в видимом диапазоне и интенсивнее поглощает в инфракрасном, чем растительный покров в более влажных регионах. Кроме того, при низком проективном покрытии растений в пустынях некоторую неопределенность в оценку вносит высокая отражательная способность почв в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Тем не менее исследования, проведенные в 1980—1990-х годах в Сахели, свидетельствуют о том, что вегетационный индекс коррелирует с зеленой фитомассой и имеет высокую чувствительность к осадкам (Tucker et al., 1985; Prince, 1991; Tucker et al., 1991). Этот вывод подтверждается исследованиями на засушливых землях Северной Евразии (Gitelson, Kogan, 2000; Золотокрылин и др., 2000).

Применительно к заданной территории (Туранская низменность и восточная часть Прикаспийской низменности) было проведено сравнение численных оценок составляющих уравнения теплового баланса в суточном ходе по модели теплового баланса подстилающей поверхности

А. Б. Шмакина (1997) с данными наблюдений. Сравнение показало удовлетворительное согласие численных результатов с данными наблюдений. Затем были сопоставлены график связи между вычисленной из уравнения теплового баланса температуры поверхности и альбедо (оно в модели задавалось из наблюдений) и аналогичный график связи, построенный по данным спутниковых наблюдений. Данное сопоставление также подтвердило согласие модельного и наблюдаемого графиков. Дополнительно на этом этапе проведено обобщение опубликованных результатов численных экспериментов по чувствительности МОЦА к изменению характеристик поверхности в Средней Азии (Кислов, 2001; Кислов, Сурова, 1995), а также в странах Сахели (Charney, 1975; Charney et al., 1977; Sud, Fennesy, 1982; Folland et al., 1986; Laval, 1986; Sud, Molod, 1988; Xue, Shukla, 1993; Polcher, 1995; Zhang, Henderson-Sellers, 1996; Zheng, Eltahir, 1997).

На каждом этапе пополнялись многолетние ряды данных о температуре и осадках с суточным шагом, полученные на основной метеосети России и сопредельных территорий.

Как показано в работах (Золотокрылин, 2002, 2003), процессы аридизации засушливых земель хорошо выражены при доминировании радиационного механизма теплообмена между поверхностью и атмосферой. Согласно данным наших наблюдений в Казахстане, Средней Азии и Монголии, этот механизм проявляется в пустынных экосистемах с запасами зеленой фитомассы $\leq 0,5$ т/га (сухой массы), что эквивалентно значению $NDVI \leq 0,07$. По мере накопления наблюдений за $NDVI$, начало которых относится к 1982 г., значимость индикатора $NDVI \leq 0,07$ для мониторинга климатического опустынивания возрастает.

Многолетние карты индикатора строились следующим образом: на исследуемой территории в каждой одноградусной ячейке или 8×8 км определялась сумма месяцев за сезон вегетации (май—сентябрь в Евразии и июль—сентябрь в странах Сахели) с $NDVI \leq 0,07$ за десятилетние периоды 1982—1991 и 1992—2001 гг. Далее вычислялось среднее многолетнее значение индикатора за сезоны вегетации каждого десятилетия. Индикатор указывает период в течение сезона вегетации, в течение которого $NDVI$ не превышал порогового значения. Нулевая изолиния индикатора рассматривается в качестве многолетней границы распространения климатического опустынивания. Индикатор увеличивается по направлению к аридным землям, и в экстрааридных землях он приближается к максимальному значению — периоду вегетации.

Результаты

Описание основных результатов представлено в соответствии с новым взглядом на гипотезу климатического опустынивания с обратными связями. На рис. 1 схематично показаны основные ее положения, раскрывающие факторы, механизмы и индикаторы климатического опустынивания.

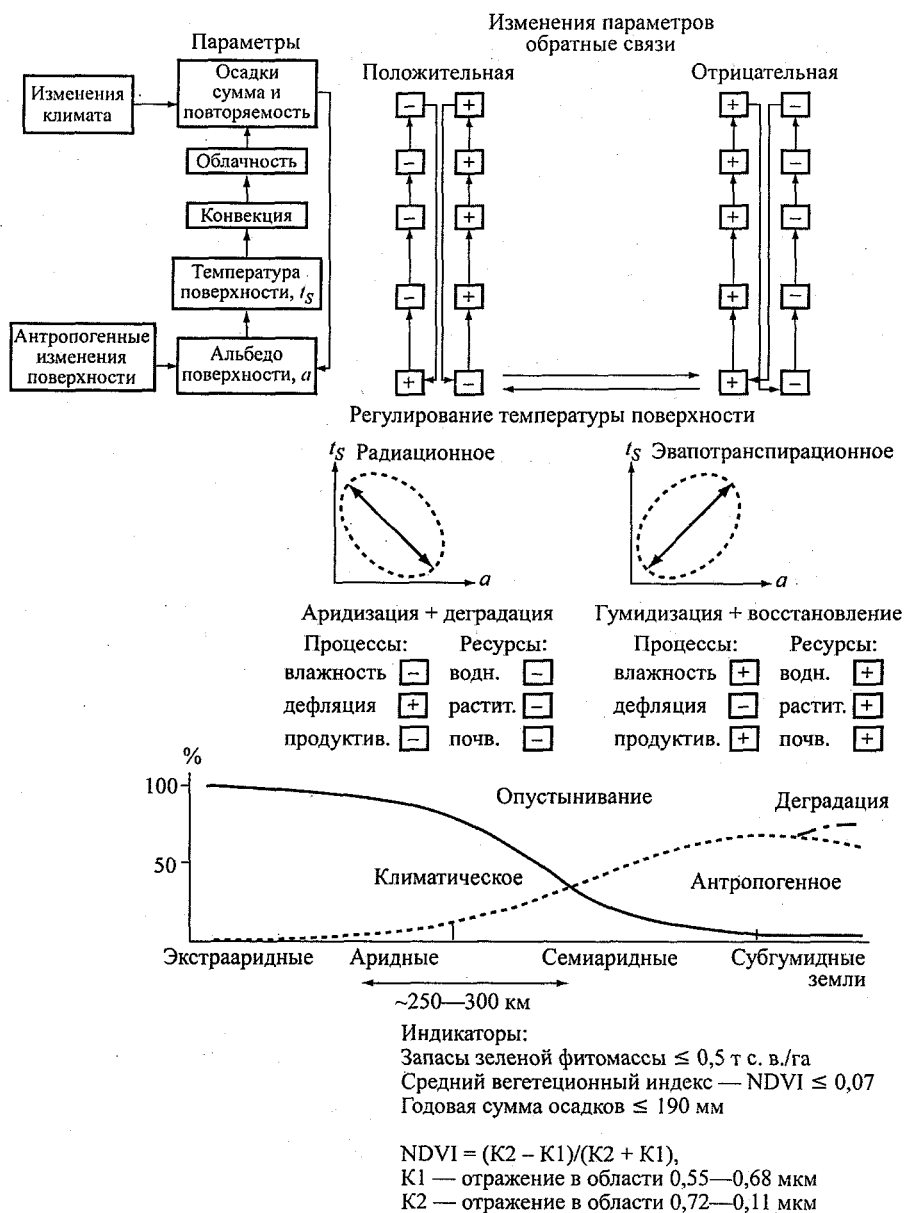


Рис. 1. Схема обратной связи альbedo—осадки в климатической системе засушливых тропиков.

Изменения параметров: плюс — увеличение, минус — уменьшение.

Как видно из рисунка, изменения климата и антропогенная деятельность выступают в качестве внешних факторов обратных связей. Новым положением, долгое время остававшимся незамеченным, является включение в список параметров повторяемости осадков. Интенсивность опустынивания определяется не только уменьшением суммы осадков, но и уменьшением повторяемости слабо- и умеренно интенсивных осадков (Казанский, Золотокрылин, 2002). Увеличение повторяемости осадков сдерживает опустынивание, даже если сумма осадков остается постоянной. Увеличение повторяемости сильных осадков скорее способствует процессам опустынивания за счет смыва органики с поверхности почвы, усиления эрозионных процессов, чем его сдерживанию. Повторяемость осадков подвержена заметной пространственно-временной изменчивости (Титкова, 2003; Семенов, Гельвер, 2003; Le Barbe, Lebel, 1997; Lebel, Le Barbe, 1997).

Слева на схеме представлен альбедный механизм опустынивания Чарни. Он характеризуется доминированием радиационного регулирования температуры поверхности с отрицательной корреляцией между альбедо и температурой на экстрааридных и большей части аридных земель. Справа на схеме представлена отрицательная обратная связь с эвапотранспирационным регулированием и положительной корреляцией между параметрами, которая доминирует на субгумидных землях. Из схемы видно, что положительная обратная связь может переключаться на отрицательную в переходной области от аридных земель к субгумидным, где значение радиационного регулирования температуры поверхности уменьшается по сравнению с эвапотранспирационным.

Подход к выделению этой области по изменению соотношения между альбедо и температурой поверхности в разных засушливых регионах (Туранская и Прикаспийская низменности, Южное Прибалхашье, Восточная Сахель) детально обсуждается в посвященной климатическому опустыниванию монографии (Золотокрылин, 2003). Для того чтобы показать универсальность данного подхода, рассмотрим новые примеры. На рис. 2 цифрами I и II обозначены поля корреляции между альбедо и температу-



Рис. 2. Соотношение между месячным альбедо (a) и месячной температурой поверхности (t_s) вдоль меридиональной трансекты.

рой поверхности на меридиональных трансектах 42—49° с. ш., 103—108° в. д. (Монголия) и 14—20° с. ш., 12—15° з. д. (Западная Сахель). Каждый квадратик отражает осредненное в широтной полосе 0,1° альбедо и температуру поверхности. Альбедо монотонно возрастает от степи (сухой низкотравной саванны) к полупустыне (опустыненной саванне) и несколько понижается в пустыне. Отрицательная корреляция характерна для пустынь с радиационным регулированием температуры поверхности. Положительная корреляция имеет место в степи (сухой низкотравной саванне). В полупустыне (опустыненной саванне) корреляция ослабевает, и по мере продвижения к пустыне эвапотранспирационное регулирование температуры подавляется радиационным. Если сравнить данные рис. 2 с картами зональных экосистем и NDVI, то можно заметить, что переходная область в Монголии включает полупустынные экосистемы и южную часть экосистем засушливых (дерновинно-злаковых) степей. В Западной Сахели в область входят экосистемы опустыненной саванны и значительная часть экосистем сухой низкотравной саванны.

Характерной особенностью зональных экосистем является то, что они являются индикаторами характера теплообмена. В табл. 1 и 2 перечислены зональные экосистемы с оценкой их продуктивности и характера теплообмена. Так, в пустынных южных и в узкой полосе пустынных северных экосистем на Туранской низменности зеленая фитомасса которых менее 0,5 т/га, доминирует радиационный тип теплообмена. Он характеризуется отношением Боуэна более 3. Для сухостепных и полупустынных экосистем выражен эвапотранспирационный тип с отношением Боуэна менее 2. Между ними лежит экотонная полоса пустынных северных экосистем с быстро нарастающей надземной фитомассой, которая в среднем выше по сравнению с соседними зонами. На юге экотона зеленая фитомасса достигает порогового значения 0,5 т/га ($NDVI \leq 0,07$), которое принимается в качестве индикатора радиационного типа теплообмена и, следовательно, климатического опустынивания. Аналогичная связь между зональными экосистемами, их продуктивностью и характером теплообмена прослеживается и в других засушливых регионах.

С этой точки зрения за границу распространения климатического опустынивания можно принять пороговое значение $NDVI \leq 0,07$, а территорию, в пределах которой граница мигрирует в сезонном и межгодовом ходе, можно считать областью климатического опустынивания. С многолетней миграцией границы связана обратимость данного процесса. Область климатического опустынивания отличается от соседних повышенной изменчивостью характеристик поверхности. Здесь положительная обратная связь подавляется отрицательной обратной связью.

Рассмотрим изменение климатического опустынивания в заданных регионах в 1992—2001 гг. по сравнению с предыдущим десятилетием 1982—1991 гг. (рис. 3). Сплошные изолинии показывают увеличение периода с аридизационными процессами во второе десятилетие, а штрихо-

Таблица 1

Средневзвешенные зональные показатели продуктивности растительного покрова на территории Казахстана и Средней Азии

Зона (° с. ш.)	Экосистемы	Фитомасса/продукция	
		надземная	зеленая
45—51	Сухостепные и полупустынные	$1,8 \pm 0,2 / 1,5 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,1 / 1,1 \pm 0,2$
44—48	Пустынные северные	$3,5 \pm 0,3 / 2,1 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,1 / 0,6 \pm 0,1$
39—44	Пустынные северные и южные	$2,0 \pm 0,2 / 0,5 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1 / 0,4 \pm 0,1$

Примечание. Числитель — фитомасса (т/га (сухая масса), знаменатель — продуктивность (т/га в год) (среднее и ошибка среднеарифметического).

Таблица 2

Зональные показатели продуктивности зеленых фракций растений (сухая масса), среднего вегетационного индекса (NDVI) за май—сентябрь, 1982—2001 гг.), отношения Боуэна ($Bo = H / LE$, где H и LE — соответственно потоки явного и скрытого тепла) на засушливых землях Казахстана и Средней Азии

Зона (° с. ш.)	Экосистемы	Продуктивность, т/(га·год)	NDVI	Отношение Боуэна, июль, полдень
45—51	Сухостепные и полупустынные	$1,1 \pm 0,2$	$>0,2$	<2
44—48	Пустынные северные	$0,6 \pm 0,1$	$0,05—0,2$	$2—3,5$
39—44	Пустынные северные и южные	$0,4 \pm 0,1$	$<0,05$	>3

вые — уменьшение. Нулевая изолиния — это внешняя граница аридизационных процессов регионального характера. Вне границы аридизационные процессы локальны и их воздействие на атмосферные процессы ограничено. Как видно из рис. 3 а область климатического опустынивания покрывает большую часть Средней Азии и Казахстана и включает аридные и местами семиаридные зональные экосистемы. Период с аридизационными процессами внутри области возрастает по направлению к югу и в южнопустынных экосистемах достигает 4—4,5 месяцев из 5. Важно отметить, что в область входит только восточная часть Прикаспийской низменности. Сухостепные и полупустынные экосистемы на территории России лежат далеко вне области.

Опустынивание — динамичный процесс. Период с аридизационными процессами увеличился в последнее десятилетие на большей части области (см. рис. 3 а). Максимальное увеличение от 0,5 до 1,5 месяца произошло

восточнее усыхающего Аральского моря. В то же время отмечается некоторое сокращение периода на небольших участках между Каспием и Аралом.

Для того чтобы понять тенденцию локальной аридизации обратимся к территории юго-востока Европейской части России (Калмыкия и часть Астраханской области) (рис. 3 б). В Восточной Калмыкии и в Астраханской области (северо-восточный угол рисунка, русло Волги проходит в юго-восточном направлении от 46,5° в. д. до обреза карты) в последнее десятилетие отмечается увеличение периода по обе стороны от долины реки Волги. Юго-западнее реки Волги период сокращается. Особенно заметное сокращение (почти на четверть месяца) произошло на деградированных Черных землях Калмыкии (46,5—45,9° с. ш. и 46,2—46,7° в. д.). Еще юго-западнее заметна прерывистая полоса с очень слабым увеличением периода. На остальной территории картина мало меняется на протяжении двух десятилетий.

Следующей иллюстрацией изменения периода с аридизационными процессами служит территория Монголии (рис. 3 в). Совместный анализ карты зональных экосистем Монголии и географического распределения индикатора указывает на заметное расширение области с аридизационными процессами. Нулевая граница индикатора в 1982—1991 гг. проходила в пределах распространения экосистем очень сухих (полукустарничково-дерновинно-злаковых) степей, а в 1992—2001 гг. сместилась к северу в южную полосу зональных экосистем засушливых (разнотравно-дерновинно-злаковых) степей и приблизилась к южной границе распространения экосистем (дерновинно-злаковых) степей на востоке Монголии. Таким образом, указанные зональные экосистемы можно рассматривать как экотонные.

Междекадное изменение периода неоднородно на территории: в последнее десятилетие оно возрастает в экотонной полосе экосистем и уменьшается во внутригорно-котловинных районах Гоби—Алтайской области.

Заметное междекадное изменение периода произошло в странах Сахели (рис. 3 г). Во второе десятилетие область с аридизационными процессами сократилась. Проходившая в южной части зоны сухих низкотравных саванн нулевая граница индикатора приблизилась к зоне опустыненных саванн. Тенденция сокращения периода отмечается в основном в зоне опустыненных саванн. На крайнем западе территории период уменьшается не только в опустыненной саванне, но и в сухой низкотравной саванне. Следует отметить, что в предыдущее десятилетие антропогенно деградировавшие земли (выделены серым фоном) почти целиком входили в область климатического опустынивания. Это обстоятельство придавало опустыниванию катастрофический характер. В последнее десятилетие область климатического опустынивания в незначительной степени перекрывается с деградированными землями.

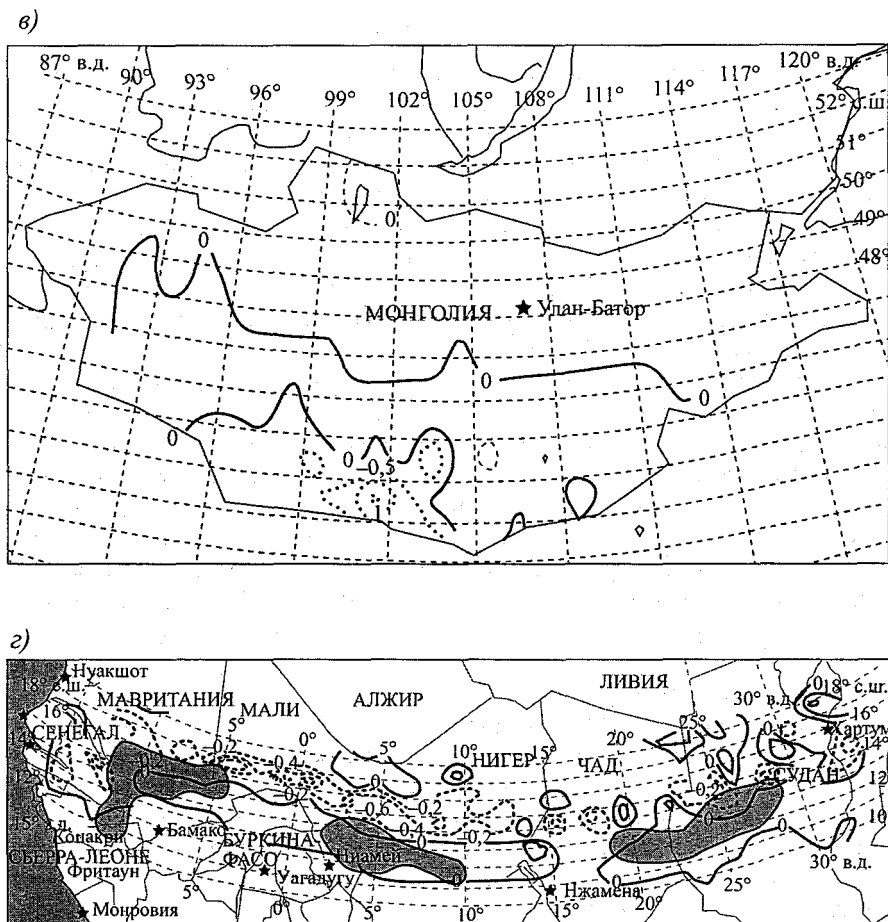


Рис. 3. Изменение индикатора климатического опустынивания засушливых земель Евразии и Северной Африки в 1992—2001 гг. относительно 1982—1991 гг.

а — Казахстан и Узбекистан, май—сентябрь; *б* — Калмыкия и Астраханская область, май—сентябрь; *в* — Монголия, май—сентябрь; *г* — страны Сахели, июль—сентябрь; серым фоном выделены деградированные в результате деятельности человека земли. Изолинии — период (месяцы) с преимущественным климатическим опустыниванием в течение вегетационного сезона. Прерывистые изолинии — уменьшение периода. Индикатор вычислен по месячным данным NDVI за 1982—2001 гг. (DAAC...).

Обсуждение

Новый взгляд на климатическое опустынивание с обратными связями позволяет определить его проявление через изменение характера теплообмена засушливых земель с приземной атмосферой. Полученные результаты подлежат более глубокой трактовке, если принять во внимание механизм влияния изменения теплообмена на региональную конвекцию и, следовательно, на осадки в результате деградации земель. Этот механизм обнаружен для тропической конвекции, в частности в Северной Африке, в серии экспериментов LMD-МОЦА: увеличение потока явного тепла вызывает увеличение числа случаев с глубокой конвекцией, а также повторяемости осадков (Polcher, 1995).

Применительно к засушливым землям с $NDVI > 0,07$ ситуация с увеличением потока явного тепла возникает в условиях засухи. Тогда повышение альбеда за счет стрессового состояния растительного покрова приводит к повышению температуры поверхности и росту потока явного тепла, который влияет на увеличение повторяемости осадков. Триггерная роль явного потока тепла еще не исследована в умеренных широтах. Но выявленная из наблюдений универсальность изменения характера теплообмена в тропических и умеренных широтах указывает на возможность зависимости повторяемости осадков от изменения теплообмена в умеренных широтах. Более того, как следует из наблюдений, повторяемость осадков очень изменчива во времени и в пространстве.

Другой важный вопрос, который вытекает из анализа результатов, — это выяснение роли антропогенной деградации засушливых земель в опустынивании. Выявленная особенность распространения аридизационных и антропогенных деградационных процессов в данных регионах состоит в том, что они могут перекрываться, но области с максимальной интенсивностью этих процессов практически не совпадают. Наиболее интенсивная аридизация климата имеет место вблизи пустынь, в то время как интенсивная деградация характерна для субгумидных земель с высокой антропогенной нагрузкой. Если фитомасса не достигает порогового значения на деградированных землях, то они лежат вне сферы региональных аридизационных процессов. С этой точки зрения легко объясняется основной результат экспериментов на МОЦА с учетом реального землепользования в Сахели в 1961, 1996 и сценарного в 2015 гг.: изменение землепользования не полностью объясняет уменьшение количества осадков в последние десятилетия XX в. (Taylor et al., 2002).

И, наконец, в противоположность точке зрения о глобальном характере опустынивания мониторинг климатического опустынивания указывает на региональную асинхронность этого процесса. Результаты свидетельствуют о стабильности внешней границы опустынивания на Туранской низменности, некотором ее отступлении в Восточной Сахели и наступлении в Монголии.

Заключение

Представленные результаты не противоречат предложенной гипотезе климатического опустынивания с обратными связями. Она может стать основой для синтеза представления об опустынивании как одного из проявлений глобальных изменений.

Учет новых механизмов климатического опустынивания (повторяемость осадков, триггерное свойство теплообмена) поможет улучшить качество математического моделирования этого явления с помощью комбинированных моделей атмосферы—океана—биосферы и региональных климатических моделей.

Продemonстрированный подход к оценке распространения и динамики климатического опустынивания с использованием NDVI-индикатора расширяет возможности глобального и регионального мониторинга опустынивания.

Благодарность

Автор считает своей приятной обязанностью высказать благодарность зав. лабораторией климатологии ИГРАН А. Б. Шмакину за представленные для обобщения результаты численной оценки составляющих уравнения теплового баланса на Туранской и Прикаспийской низменностях.

The author wish to thank the Distributed Active Archive Center (Code 902.2) at the Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 20771, for producing the data in their present form and distributing them. The original data products were produced under the NOAA/NASA Pathfinder program, by a processing team headed by Ms. Mary James of the Goddard Global Change Data Center; and the science algorithms were established by the AVHRR Land Science Working Group, chaired by Dr. John Townshed of the University of Maryland. Goddard's contributions to these activities were sponsored by NASA's Mission to Planet Earth program.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилович Н. А. 1993. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. — М.: Наука. — 293 с.
- Бейдеман И. Н. 1983. Справочник по расходу воды растениями в природных зонах СССР. — Новосибирск, Наука, СО. — 255 с.
- Биологическая продуктивность растительности Казахстана. 1974. Алма-Ата, Наука. — 287 с.
- Золотокрылин А. Н. 1986. Связь альbedo и температуры поверхности суши в аридных областях. — Матер. метеорол. исслед. Межвед. геоф. ком. АН СССР, № 10, с. 38—45.
- Золотокрылин А. Н. 2002. Индикатор аридности климата. — Аридные экосистемы, т. 8, № 6, с. 47—59.
- Золотокрылин А. Н. 2003. Климатическое опустынивание. Отв. ред. А. Н. Кренке. — М.: Наука. — 246 с.

- Золотокрылин А. Н., Коняев К. В., Титкова Т. Б. 2000. Зависимость между аномалиями индекса вегетации и аномалиями месячных сумм осадков в зоне умеренного и недостаточного увлажнения. — Исслед. Земли из Космоса, № 6, с. 74—78.
- Казанский А. Б., Золотокрылин А. Н. 2002. Значение повторяемости осадков при разной интенсивности опустынивания. — Изв. РАН, сер. геогр., № 1, с. 36—41.
- Казанцева Т. И. 1986. Распределение и динамика продуктивности надземной фитомассы. — Пустыни Заалтайской Гоби. — М.: Наука, с. 106—113.
- Казанцева Т. И. 1988. Продуктивность фитоценозов степей и пустынь МНР. — Природные условия, растительный покров и животный мир Монголии. — Пушино, с. 242—256.
- Казанцева Т. И., Даважамц Ц. 1988. Продуктивность фитоценозов степей и пустынь МНР. — Природные условия, растительный покров и животный мир Монголии. — Пушино, с. 242—256.
- Кислов А. В. 2001. Климат в прошлом, настоящем и будущем. — М.: МАИК „Наука/Интерпериодика”. — 351 с.
- Кислов А. В., Суркова Г. В. 1995. О модели регионального климата. — Метеорология и гидрология, № 5, с. 23—31.
- Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2003. Климатические изменения годовой суммы осадков и частоты измеренных осадков на территории России и соседних стран в XX в. — ДАН, т. 393, № 6, с. 818—821.
- Титкова Т. Б. 2003. Изменения климата полупустынь Прикаспия и Тургая в XX в. — Изв. РАН, сер. геогр., № 1, с. 106—112.
- Шмакин А. Б. 1997. Методика параметризации свойств рельефа и гидрологического цикла для крупномасштабных климатических моделей и расчетов. — Матер. метеорол. исслед. — М.: Национальный геофизический комитет РАН, № 16, с. 25—52.
- DAAC: Distributed Active Archive Center. Pathfinder AVHRR Land Data. Internet: <http://daac.gsfc.nasa.gov/>
- Avissar R., Pielke R. A. 1989. A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. — Mon. Weather Rev., v. 117, p. 2113—2136.
- Charney J. G. 1975. Dynamics of deserts and drought in Sahel. — Quart. J. Royal Meteorol. Soc., v. 101, N 0428, p. 193—202.
- Charney J. G., Quirk W. J., Chow S., Kornfield J. A. 1977. Comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. — J. Atmos. Sci., v. 34, p. 1366—1385.
- Claussen M. 1997. Modeling biogeophysical feedback in the African and Indian monsoon region. — Climate Dynamics, v. 13, p. 247—257.
- Claussen M. 1998. On multiple solutions of the atmosphere-vegetation system in present-day climate. — Global Change Biol., N 4, p. 549—559.
- Climate Change 2001. 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Summary for policymakers and technical summary: WMO/UNEP.
- Folland C. K., Palmer T. N., Parker D. E. 1986. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures 1901-85; Observational, modelling, and simulation studies. — Nature, 320, p. 602—607.
- Gillet H. 1967. Essai d'évaluation de la biomasse végétale en zone sahélienne. — J. Agric. Tropicale Bot. Appl., v. 14, p. 123—158.
- Gitelson A., Kogan F. 2000. AVHRR-based spectral vegetation indices for quantitative assessment of vegetation state on productivity in semiarid and arid regions: calibration and validation. — Mediterranean desertification: Brussels, p. 579—585.
- Gutman G., Tarpley D., Ignatov A., Olson S. 1995. The Enhanced NOAA Global Land Dataset from the Advanced Very High Resolution Radiometer. — Bull. American Meteorol. Soc., v. 76, N 7, p. 1141—1156.

- Idso S. B. 1981. Surface energy balance and genesis of deserts. — *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, ser. A, 30, p. 253—260.
- Jackson R. O., Idso S. B. 1975. Surface albedo and desertification. — *Science*, v. 189, p. 369—370.
- Laval K. 1986. General circulation model experiments with surface albedo changes. — *Climatic Change*, v. 9, p. 91—102.
- Le Barbe L., Lebel T. 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950—1990. — *J. Hydrology*, v. 188—189, p. 43—73.
- Le Houerou H. N. 1980. The rangelands of the Sahel. — *J. Range Manage.*, v. 33, p. 41—46.
- Le Houerou H. N., Hoste C. H. 1977. Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean Basin and in the African Sahelo-Sudanian Zone. — *J. Range Manage.*, v. 30, p. 181—189.
- Lebel T., Le Barbe L. 1997. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 2. Point and the estimation at the event and seasonal scales. — *J. Hydrology*, v. 188—189, p. 97—122.
- Otterman J. 1974. Baring high-albedo soils by overgrazing: hypothesized desertification mechanism. — *Science*, v. 186, N 4163, p. 531—533.
- Polcher J. 1995. Sensitivity of tropical convection to land surface processes. — *J. Atm. Sci.*, v. 52, N 17, p. 3143—3161.
- Prince S. D. 1991. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981—1988. — *Int. J. Remote Sensing*, v. 12, p. 1301—1311.
- Ripley E. A. 1976. Drought in the Sahara: Insufficient biogeophysical feedback. — *Science*, v. 191, p. 100.
- Seguin B., Assad E., Freteaud J. P., Imbernon J., Kerr Y., Lagourde J. P. 1987. Suivi du bilan hydrique à l'aide de la télédétection par satellite. Application au Sénégal. — Report to the EEC-DG8. Brussels, February.
- Sud Y. C., Fennessy M. 1982. A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM. — *J. Climatology*, v. 2, p. 105—125.
- Sud Y. C., Molod A. 1988. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall. — *Mon. Weather Rev.*, 116, p. 2388—2400.
- Taylor C. M., Lambin T. F., Stephenne N., Harding R. I., Essery R. L. H. 2002. The Influence of land use change on climate in the Sahel. — *J. Clim.*, 15, p. 3615—3629.
- Tucker C. G., Vanpraet C. L., Sharman M. J., Van Ittersum G. 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980—1984. — *Remote Sensing of Environment*, v. 17, p. 233—249.
- Tucker C. J., Sellers P. G. 1986. Satellite remote sensing of primary production. — *Remote Sensing*, N 7, p. 1395—1416.
- Tucker C. J., Dregne H. E., Newcomb W. W. 1991. Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. — *Science*, v. 253, N 5017, p. 299—301.
- Wang G., Eltahir E. A. B. 2000. Biosphere-atmosphere interactions over West Africa. II: Multiple climate equilibria. — *Q. J. Meteorol. Soc.*, 126, p. 1261—1280.
- Wendler G., Eaton F. 1983. On the desertification of the Sahel zone. P.1: Ground observations. — *Climate Change*, N 4, p. 365—380.
- Xue Y., Shukla J. 1993. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: Desertification. — *J. Clim.*, 6, p. 2232—2245.
- Zeng N., Neelin J. D. 2000. The Role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna. — *J. Clim.*, 13, p. 2665—2670.
- Zheng X., Eltahir E. A. B. 1997. The response to deforestation and desertification in a model of West African monsoon. — *Geophys. Res. Lett.*, v. 24, p. 155—158.

**ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА
ИЗ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ БОЛОТ
КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА**

О. А. Анисимов, С. А. Лавров, С. А. Ренева*

* РФ, 199053 Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23, Государственный гидрологический институт, oleg@oa7661.spb.edu

Реферат. Современные данные указывают на то, что увеличение глубины протаивания многолетнемерзлых болот в тундровой и лесотундровой зонах России в условиях антропогенного потепления может привести к усилению эмиссии парниковых газов. Важным является вопрос об эмиссии метана из сезонно протаивающих болот, поскольку его парниковый эффект более чем в 20 раз превышает воздействие равного количества углекислого газа.

В данной работе на основе современных геоинформационных технологий оценена площадь многолетнемерзлых болот криолитозоны России и с помощью модели вечной мерзлоты рассчитаны изменения глубины сезонного протаивания и температуры талого слоя. Модель углеродного цикла была использована для оценки изменения эмиссии метана в условиях прогнозируемого на середину XXI в. климата. Были получены прогностические оценки изменения объема сезонно талого слоя многолетнемерзлых болот и эмиссии метана для криолитозоны России.

Ключевые слова. Криолитозона, парниковые газы, изменение климата, прогноз.

**ASSESSING THE METHANE EMISSIONS
FROM THE FROZEN WETLANDS IN RUSSIA
UNDER CONDITIONS OF CHANGING CLIMATE**

O. Anisimov, S. Lavrov, S. Reneva*

* State Hydrological Institute, 23, Second Line V.O., 199053 St.Petersburg, Russia, oleg@oa7661.spb.edu

Abstract. There is a growing empirical evidence that thickening of the active layer in the frozen wetlands under conditions of anthropogenic warming will lead to enhanced emissions of the greenhouse gases. Serious concerns are associated with the emissions of methane from thawing wetlands, because it has more than twenty times stronger greenhouse effect than the equal amount of CO₂.

The area of frozen wetlands in Russia was identified using a GIS technique. A permafrost model was applied for the calculation of changes in the depth of seasonal thawing and temperature of the active layer. Enhancement of methane emissions from the frozen wetlands under projected climate change for the mid-21st century was estimated using the model of carbon cycle. Changes in the total volume of seasonally thawing peat in the frozen wetlands in Russia were computed and the predictive maps of methane emissions were drawn.

Keywords. Cryolitozone, greenhouse gases, climate change, forecast.

Введение

Данные наблюдений указывают на то, что произошедшие в последние несколько десятилетий изменения климата значительно превысили пределы его естественной изменчивости. Согласно концепции антропогенного влияния на климат, такие изменения, помимо естественных причин, могут быть обусловлены увеличением содержания парниковых газов в атмосфере (Houghton et al., 2001). В результате бурного развития прогностической климатологии начиная с 1980-х и до середины 1990-х годов удалось прояснить роль различных климатообразующих факторов как естественного, так и антропогенного происхождения и получить оценки будущего климата для середины XXI в. Вместе с тем, в последние несколько лет пришло понимание ограниченности наших знаний относительно отклика климатической системы на антропогенное воздействие. В этом отношении показательны выводы, сделанные Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) во втором и третьем оценочных отчетах (Houghton et al., 2001; Houghton et al., 1996). Данные более позднего отчета, в целом подтверждающие сделанные ранее выводы, мало что добавляют к ним, что увеличивает диапазон неопределенности оценки изменения средней годовой глобальной температуры воздуха к концу XXI в. с 1,0—3,5 до 1,4—5,8 °C. Одна из причин, по которой в настоящее время трудно дать более точную оценку предстоящих изменений климата, — недостаточная изученность обратных связей в климатической системе, которые могут либо усилить, либо смягчить первоначальное потепление вследствие антропогенного воздействия. Большие неопределенности связаны с оценкой эмиссии парниковых газов и ее возможных изменений в будущем.

С 1880 г. по настоящее время концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась с 280 до 370 миллионных долей по объему (ppmv). Скорость роста концентрации CO₂ в атмосфере постоянно возрастает, и если в 1980-х годах она составляла около 1,5 ppmv в год, то в 1990-х годах уже достигла 2,8 ppmv в год. Как минимум 75 % этого роста обусловлено сжиганием ископаемого топлива (Израэль и др., 2001). Одновременно увеличивается концентрация метана в атмосфере, причем значительно более

высокими темпами. В среднем за XX в. это увеличение составило около 1 % в год (Dlugokencky et al., 1995). С 1750 по 2000 г. концентрация метана выросла на 1,06 ppmv, что составило 15 % начального значения. В середине 1980-х годов рост концентрации метана несколько замедлился до 0,55—0,56 % в год (Яговкина и др., 2003) и в 1990-х годах по сравнению с 1980-ми стал более изменчивым (Израэль и др., 2001).

Болота и переувлажненные территории являются источниками метана, причем оценки их вклада в общую эмиссию заметно различаются. По данным монографии (Будыко и др., 1991), из 550 млн. т ежегодной эмиссии метана на долю болот и переувлажненных земель приходится около 100 млн. т. Из них, согласно данным Матьюз и Фанг (Matthews, Fung, 1987), около 62 млн. т в год составляет эмиссия в зоне 50—70° с. ш. В более поздних работах даются существенно более низкие оценки эмиссии метана в высоких широтах: от 24 млн. т/год (Aselmann, Crutzen, 1989) до 39 млн. т/год (Barlett, Harriss, 1993), а для районов севернее 60° с. ш. — не более 10—11 млн. т/год (Barlett, Harriss, 1993). По данным Паникова (Паников и др., 1997; Паников и др., 1996), в настоящее время годовая эмиссия метана из бореальных болот Евразии составляет 10,5 млн. т, в Западной Сибири — 22,2 млн. т, из болот России — 24—33 млн. т, а на территории бывшего СССР (за исключением России) — 11 млн. т. Относительно сухие арктические почвы выделяют мало метана (от 0,6 до 11 мг/м² в сутки) и периодически из источника становятся нетто-стоком атмосферного метана с интенсивностью, достигающей от -0,5 до -3,0 мг/м² в сутки (Whalen et al., 1991; Whalen, Reeburgh, 1990).

Большая часть болот России расположена на территории криолитозоны, что накладывает определенные ограничения на эмиссию парниковых газов. Процессы, приводящие к эмиссии газов, имеют место лишь в слое сезонного протаивания. Глубина этого слоя и температура талого грунта являются двумя основными факторами, определяющими эмиссию парниковых газов многолетнемерзлых болот. В контексте проблемы антропогенного потепления представляется важным оценить возможные изменения вечной мерзлоты и обусловленную этим эмиссию парниковых газов.

Многолетнемерзлые грунты распространены на 25 % площади суши северного полушария (около 26 млн. км²), занимая в России 63 % площади страны (более 10 млн. км²). На протяжении многих столетий криогенные почвы накапливали углерод, поскольку скорость его разложения в условиях низких температур и непродолжительного теплого периода была ниже скорости аккумуляции. Современный запас углерода в арктических почвах оценивается в 455 Гт, что составляет 14 % почвенного углерода всей Земли (Oechel et al., 1993). В последнее десятилетие знак потока углерода в тундровой зоне стал изменяться, так как выделение углерода за счет декомпозиции органических веществ стало превышать его поглощение растительностью, которое, в свою очередь, также возросло (Oechel et al., 1997; Zimov et al., 1996). При дальнейшем развитии потепления этот процесс мо-

жет усиливаться, что приведет к дополнительному поступлению парниковых газов в атмосферу. Наибольшие эмиссии возможны при протаивании многолетнемерзлых болот и переувлажненных арктических земель.

Переувлажненные почвы и болота занимают в Арктике почти 2 млн. км² и содержат около 50 Гт углерода (Shaver et al., 1992). Выход углерода в виде конечного продукта декомпозиции органических веществ в арктических почвах во многом зависит от глубины сезонного протаивания и гидрологического режима. Эти факторы определяют соотношение между аэробной зоной талой почвы, расположенной выше уровня грунтовых вод, и нижележащей анаэробной зоной. В аэробной зоне разложение органики приводит к выделению углекислого газа, в то время как в анаэробных условиях продуктом декомпозиции является метан. Как известно, парниковый эффект метана более чем в 20 раз превышает действие равного количества углекислого газа, и по этой причине конечный результат воздействия декомпозиции органических веществ в тундровой зоне на глобальную климатическую систему в значительной степени будет зависеть от гидрологических условий. По имеющимся оценкам, в ближайшие десятилетия потепление может привести к понижению уровня болотных вод за счет улучшения дренирования, более глубокого сезонного протаивания мерзлоты, увеличения испарения и транспирации. При этом можно ожидать, что равновесие сместится в сторону продукции углекислого газа, и при общем росте потока углерода в атмосферу доля метана будет уменьшаться. Иная картина может иметь место при увеличении количества осадков и отсутствии стока болотных вод. В этом случае можно ожидать повышения уровня болотных вод, увеличения анаэробной зоны в сезонно талом слое, вследствие чего возможно усиление эмиссии метана. Получить более точные оценки этих процессов и определить их вклад в парниковый эффект можно на основе моделирования сезонного протаивания и гидрологического режима многолетнемерзлых болот, а также углеродного газообмена в условиях изменения климата. В данной работе рассматривается применение таких моделей для прогноза глубины протаивания многолетнемерзлых болот криолитозоны России и расчета изменения эмиссии парниковых газов.

Моделирование сезонного протаивания многолетнемерзлых болот

Для прогноза глубины сезонного протаивания и температуры талого слоя многолетнемерзлых болот в условиях антропогенного потепления была применена стационарная модель вечной мерзлоты (Анисимов, Белолуцкая, 2003). Расчет проводился последовательно в узлах регулярной сетки с пространственным шагом 0,5° по широте и долготе. Влажность (в зимний период льдистость в водном эквиваленте) болотной торфяной залежи задавалась в пределах от 600 до 800 мм/м. Для расчета коэффициента

теплопроводности торфа λ (Вт/(м·°С)) использовались эмпирические формулы, полученные в Государственном гидрологическом институте на основе обобщения экспедиционных данных по болотным почвам Западной Сибири:

$$\begin{aligned}\lambda_M &= 0,08 \exp(0,00388 w_M), \\ \lambda_T &= (0,615 w_T + 22,2) \cdot 10^{-3}.\end{aligned}\quad (1)$$

Объемный коэффициент теплоемкости торфа, C_v (Дж/(м²·°С)) рассчитывался через удельную теплоемкость скелета $C_{ск}$ (Дж/(кг·°С)), плотность скелета $\rho_{ск}$ (кг/м³) и влажность w (мм/м) по следующим формулам:

$$\begin{aligned}C_{v,M} &= C_{ск} \rho_{ск} 2,090 w_M, \\ C_{v,T} &= C_{ск} \rho_{ск} + 4,180 w_T.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь w_M и w_T — льдистость и влажность почвы (мм/м), 4,180 и 2,090 — удельная теплоемкость воды и льда (Дж/(кг·°С)). Значения теплофизических параметров торфа, полученные на основе экспедиционных измерений, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные значения теплофизических параметров торфа

$\rho_{ск}$ кг/м ³	$C_{ск}$ Дж/(кг·°С)	w_M мм/м	w_T мм/м	λ_M Вт/(м·°С)	λ_T Вт/(м·°С)
150 — 200	1500 — 2000	600 — 900	450 — 950	0,80 — 2,60	0,30 — 0,60

Высота снежного покрова рассчитывалась по зимним осадкам и изменялась в зависимости от климатического сценария. Плотность снега считалась неизменной и равной 300 кг/м³, коэффициент теплопроводности и теплоемкость снега задавались равными $\lambda_{сн} = 0,23$ Вт/(м·°С) и $c_{сн} = 2090$ Дж/(кг·°С).

Для проведения расчетов использовались среднемесячные многолетние нормы температуры воздуха и осадков в узлах регулярной сетки с шагом $0,5 \times 1,0^\circ$ по широте и долготе из базы данных геоинформационной системы ГеоИнф Государственного гидрологического института (Анисимов, Поляков, 1998). В прогностических расчетах были использованы сценарии изменения климата для 11-летних интервалов времени вокруг 2025, 2050 и 2080 г. по моделям общей циркуляции GFDL, NCAR, CCC, HadCM и ECHAM-4. Многолетним нормам в каждом узле сетки давались приращения, значения которых определялись в соответствии с выбранным сценарием из ближайшего узла более грубой сетки моделей общей циркуляции.

Результаты расчетов показали, что все пять сценариев изменения климата дают достаточно сложную региональную картину изменения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых болот криолитозоны России. Как и в случае прогноза площади распространения вечной мерзлоты (Анисимов, Белолуцкая, 2003), среди рассмотренных пяти климатических моделей сценарий GFDL можно назвать „средним”, а сценарии NCAR и ECHAM-4 — соответственно наиболее консервативными и экстремальными в плане воздействия на многолетнемерзлые грунты. На рис. 1 представлены результаты расчетов относительного изменения глубины сезонного протаивания мерзлых болот криолитозоны северного полушария по трем сценариям для середины XXI в. Эти результаты были получены для влажности торфяной залежи 800 мм/м. Приращение глубины сезонного протаивания при потеплении климата, выраженное в абсолютных единицах, зависит от влажности торфа и возрастает с ее увеличением. Вместе с тем, сравнительные расчеты показали, что выраженное в процентах от современной величины приращение глубины сезонного протаивания мало зависит от влажности торфа, подтверждая сделанные ранее выводы (Anisimov et al., 1997).

На рис. 2 показаны результаты прогностических расчетов относительного изменения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых болот с влажностью торфяной залежи 800 мм/м, полученные с использованием сценария GFDL для трех временных срезов: вблизи 2025, 2050 и 2080 гг. Представляет интерес более подробно проанализировать региональные различия прогнозов изменения глубины сезонного протаивания по трем климатическим сценариям для различных временных срезов.

Сценарий ECHAM дает значительное увеличение глубины протаивания многолетнемерзлых болот уже в ближайшие 25—30 лет. В первой четверти XXI в. на большей части криолитозоны России она увеличится на 25—30 %, на Арктическом побережье — до 50 % и более, и лишь в Восточной Якутии прогнозируемое изменение будет в пределах 20 %. К середине столетия и в этой области глубина протаивания многолетнемерзлых болот увеличится на 25—50 %, в то время как на всем Арктическом побережье и на значительной части Западной Сибири изменения превысят 50 %. К 2080 г., согласно этому экстремальному сценарию, увеличение глубины сезонного протаивания практически везде превысит 50 % ее современной нормы.

По сценарию NCAR, в первой четверти столетия изменения глубины сезонного протаивания мерзлых болот на большей части криолитозоны не будут превышать 15 %, лишь в отдельных изолированных районах достигая 20 %. К середине столетия в юго-западной части криолитозоны России и на Чукотке глубина протаивания может увеличиться на 15—25 %, в то время как на большей части Восточной Сибири и Якутии она изменится мало. К 2080 г., по этому сценарию, глубина протаивания может местами увеличиться до 50 %, при этом в целом сохранится та же зональность, что и в предшествующие периоды.

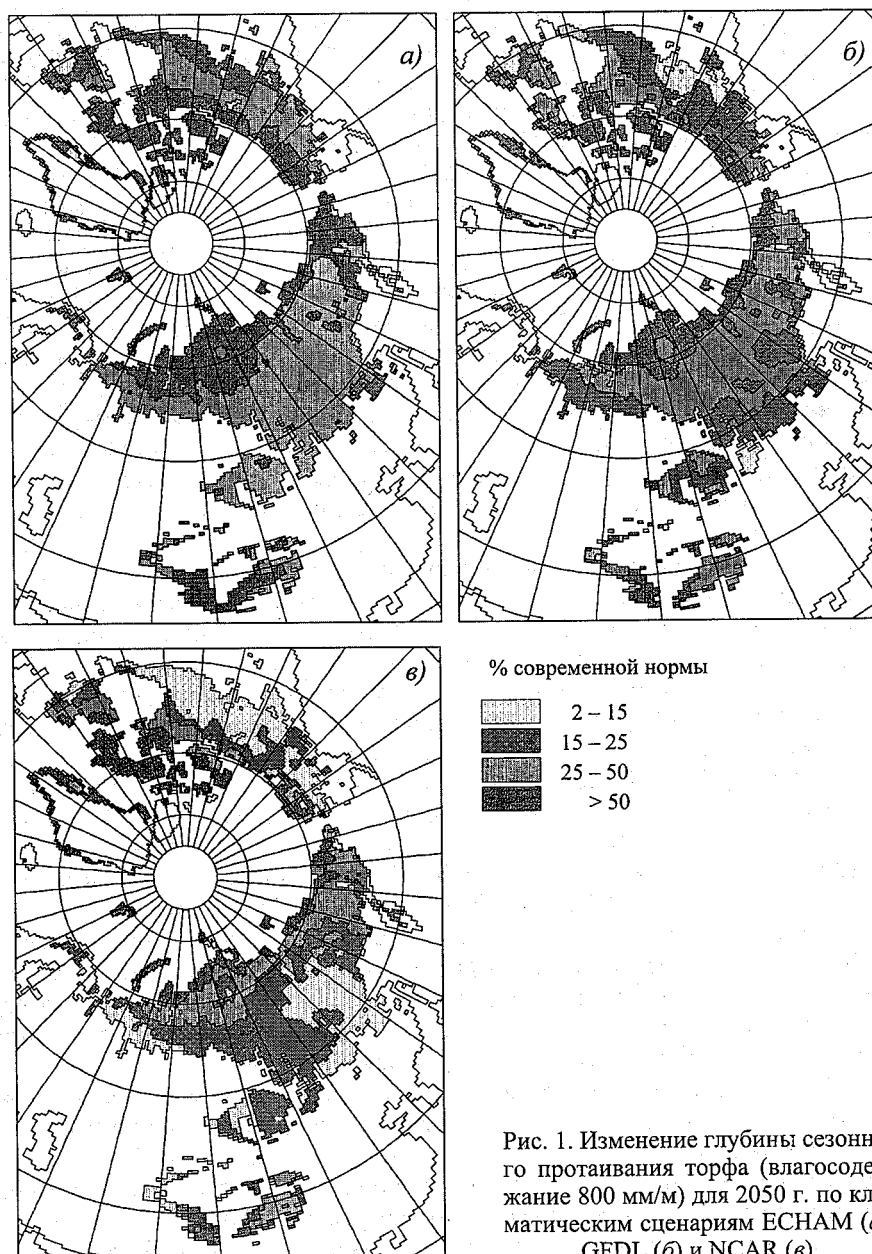


Рис. 1. Изменение глубины сезонного протаивания торфа (влажностное содержание 800 мм/м) для 2050 г. по климатическим сценариям ECHAM (а), GFDL (б) и NCAR (в).

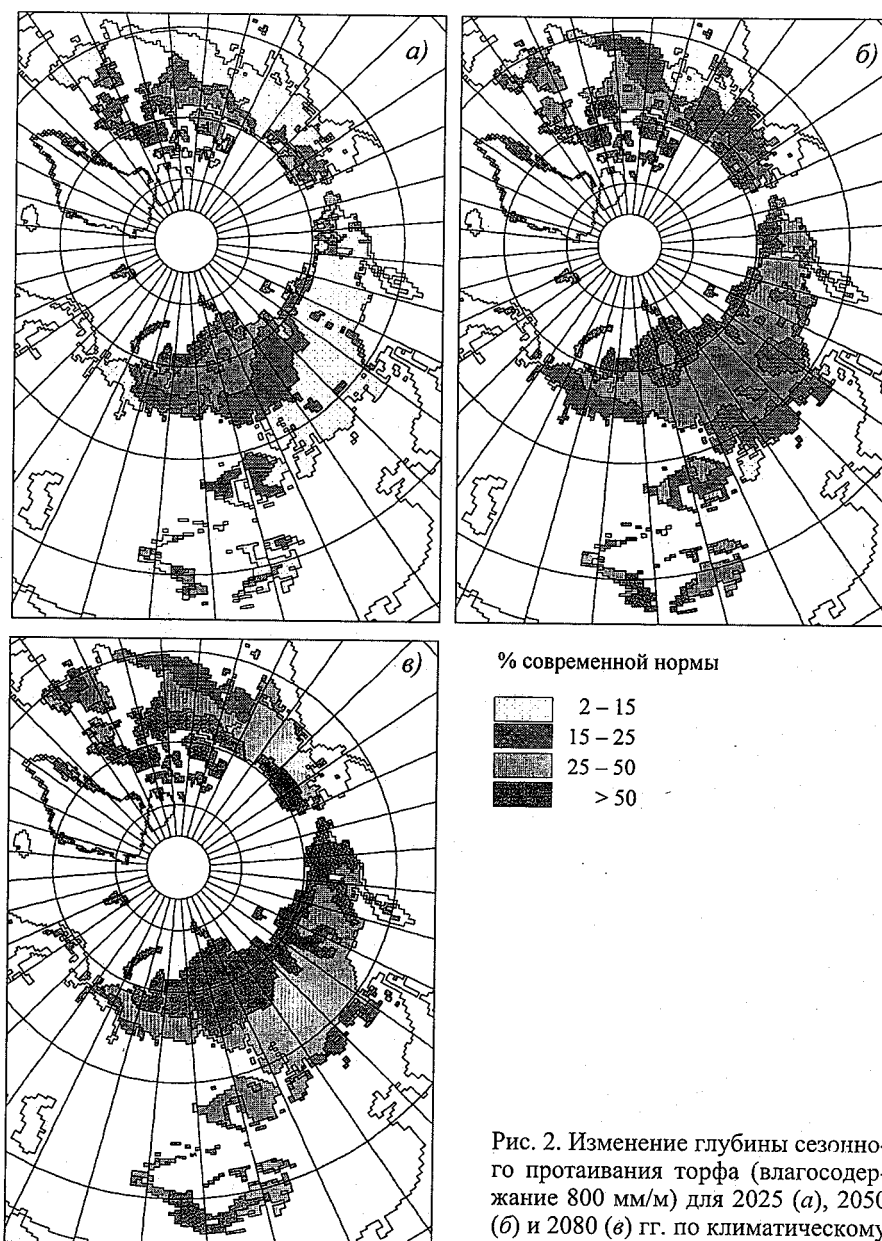


Рис. 2. Изменение глубины сезонного протаивания торфа (влажность 800 мм/м) для 2025 (а), 2050 (б) и 2080 (в) гг. по климатическому сценарию GFDL.

По „среднему” климатическому сценарию GFDL (см. рис. 2) в первой четверти столетия пространственная картина представляется приблизительно той же, что и по сценарию NCAR. В дальнейшем изменения усиливаются, подчиняясь в значительной степени широтной зональности. К середине столетия в южной периферийной области возможно увеличение глубины протаивания мерзлых болот на 15—20 %, на большей части криолитозоны (в зоне прерывистого распространения мерзлых пород) — до 50 %. На всем Арктическом побережье глубина сезонного протаивания болот может увеличиться более чем на 50 %. К концу столетия такие же сильные изменения возможны на большей части криолитозоны от Арктического побережья приблизительно до 70° с. ш., в то время как на оставшейся части глубина протаивания может увеличиться, согласно прогнозу, на 25—50 %.

Для оценки обусловленного потеплением изменения эмиссии парниковых газов необходимо знать площадь болот криолитозоны России. По данным работы (Gorham, 1991), площадь болот бореальной и субарктической зон составляет 3,46 млн. км². Эти болота сосредоточены в России (1,5 млн. км²), Канаде (1,19 млн. км²), США (0,55 млн. км²), Скандинавии и Финляндии (0,22 млн. км²). В работе (Вомперский, 1994) площадь болот России оценивается в 1,39 млн. км², в то время как данные, полученные в Государственном гидрологическом институте, указывают на то, что она составляет 1,68 млн. км² (Новиков, Усова, 2002).

На рис. 3 показана полученная нами оценка доли площади, занимаемой многолетнемерзлыми болотами в каждой из ячеек пространственной сетки в криолитозоне России. Цифрами на карте обозначены различные болотные провинции по классификации Н. Я. Каца (Кац, 1971). Эта карта была построена путем обработки топографических карт масштаба 1 : 1 000 000 с использованием ГИС-технологий. Согласно этим данным, площадь болот всей территории России составляет 0,76 млн. км², из них 0,35 млн. км² приходится на криолитозону. Отличие этой оценки от результатов, полученных другими авторами, объясняется, по всей видимости, разномасштабностью исходных материалов. Так, в работах Новикова были использованы в основном топокарты масштабов 1 : 300 000 и 1 : 500 000, а также аэрофотоснимки. Уменьшение масштаба исходных картографических данных, очевидно, приводит к занижению действительной площади за счет потери мелких болотных экосистем, причем в рассматриваемых случаях оценки различаются почти в два раза. Вводя поправку, учитывающую болота подсеточного масштаба, полученную нами оценку площади многолетнемерзлых болот криолитозоны России можно увеличить до 0,7 млн. км². Комбинируя данные, представленные на рис. 1—3, можно в каждой ячейке пространственной сетки рассчитать обусловленное потеплением увеличение объема сезонно талого слоя торфа многолетнемерзлых болот для различных сценариев изменения климата. Суммарные оценки для всей криолитозоны России приведены в табл. 2.

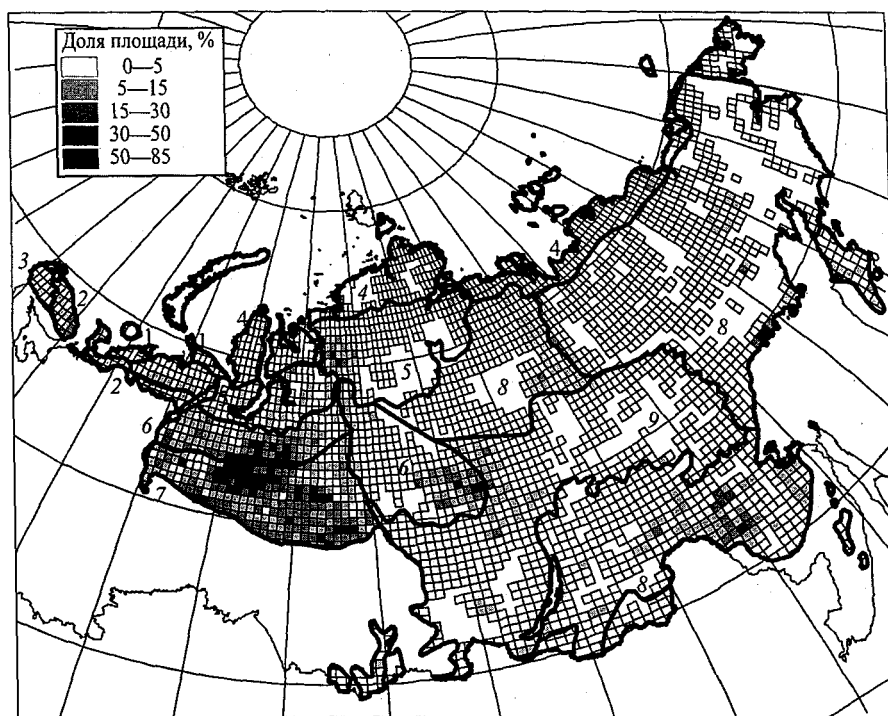


Рис. 3. Доля площади, занимаемая многолетнемерзлыми болотами в каждой из ячеек пространственной сетки криолитозоны России.

Цифрами обозначены различные болотные провинции по классификации Н. Я. Каца: 1 — тундра и мерзлые болота; 2 — крупнобугристые болота; 3 — тайга и болота типа аапа; 4 — арктические тундры и минеральные осоковые болота; 5 — тундра, лиственничные редколесья и плоскобугристые болота; 6 — тайга и крупнобугристые болота; 7 — леса и выпуклые болота; 8 — горы, равнины; 9 — таежные леса и эвтрофные болота.

Таблица 2

Расчетное увеличение объема сезонно талого слоя торфа многолетнемерзлых болот криолитозоны России (км^3) для условий будущего климата. Расчет для влагосодержания торфа 600 мм/м (числитель) и 800 мм/м (знаменатель)

Модель	2025 г.	2050 г.	2080 г.
NCAR	—	80,61/88,59	—
GFDL	80,88/90,87	137,82/150,40	153,94/173,02
ESCHAM-4	—	228,92/249,04	—

Сравнивая эти величины с современным объемом сезонного протаивания и предполагая пропорциональную зависимость интенсивности газообмена от объема талого субстрата, можно получить грубую оценку изменения эмиссии метана в криолитозоне России. Однако более точная оценка должна учитывать изменения температурного режима, продолжительности теплого периода и уровня болотных вод, равно как и ряд важных биохимических механизмов, в силу которых эмиссия метана не увеличивается пропорционально увеличению объема талого торфа. Такую оценку можно получить на основе расчетов по моделям углеродного цикла болот.

Моделирование эмиссии метана

Модель эмиссии метана с поверхности болот строится с учетом трех основных механизмов его транспорта в почвах:

- диффузия газа через воду или воздух, заполняющие поры в почве;
- пузырьковый перенос;
- транспорт газа через корневую систему растений.

Для описания транспорта метана используется одномерное уравнение диффузии

$$\frac{dC_{CH_4}}{dt} = \frac{d}{dz} \left[D \frac{dC_{CH_4}}{dz} + Q_b \right] + P_{CH_4} - O_{CH_4} + B_{CH_4}, \quad (3)$$

где $C_{CH_4} = C_{CH_{4g}}(P - W) + C_{CH_{4w}}W = C_{CH_{4g}}\{P - W(1 - \alpha)\}$,
 $D = \{D_a(P - W) + D_w\alpha W\}\tau$.

Здесь C_{CH_4} , $C_{CH_{4g}}$, $C_{CH_{4w}}$ — общая концентрация метана на глубине z от поверхности почвы, концентрация метана в газообразной и жидкой фазах; P , W — общая пористость и объемная влажность почвы; D_a , D_w — коэффициенты диффузии метана в воздухе и воде; α — растворимость метана в воде; τ — извилистость порового пространства; P_{CH_4} , O_{CH_4} — интенсивности производства и окисления метана; B_{CH_4} — интенсивность поглощения метана корневой системой; Q_b — поток метана в виде пузырьков.

Для задания основных параметров и характеристик модели используются следующие соотношения (Arah, Stephen, 1998):

$$D_a = 1,9 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T + 273}{273} \right)^{1,82} \text{ (м}^2\text{/с)}, \quad (4)$$

$$D_w = 1,5 \cdot 10^{-9} \left(\frac{T + 273}{298} \right) \text{ (м}^2\text{/с)}, \quad (5)$$

$$\alpha = 0,013 + 0,042 \exp(-0,042T), \quad (6)$$

$$B_{CH_4} = \frac{D_a \varepsilon \rho_k}{\tau_r} \left(\frac{C_{CH_{4a}} - C_{CH_4}}{z} \right),$$

$$\rho_k = b_k \rho_{k0} \exp(k_k z), \quad (7)$$

где ε — параметр, характеризующий пористость корней; ρ_k — плотность корневой системы у поверхности почвы; ρ_{k0} — максимальная плотность корневой системы у поверхности почвы; b_k — эмпирический коэффициент, учитывающий степень распространение сосудистых растений на исследуемой территории; k_k — эмпирический коэффициент; $C_{CH_{4a}}$ — концентрация метана в атмосфере; τ_r — извилистость порового пространства корней.

Окисление метана рассчитывается с использованием уравнения Михаэлиса—Ментона:

$$O_{CH_4} = V_{CH_4 Q} \left(\frac{C_{CH_4}}{K_{CH_4} + C_{CH_4}} \right) \left(\frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \right) \quad (8)$$

Здесь K_{CH_4} , K_{O_2} — константы Михаэлиса для метана и кислорода; C_{O_2} — концентрация кислорода в торфе; $V_{CH_4 Q}$ — потенциальная скорость окисления метана, зависящая от влажности и температуры почвы:

$$V_{CH_4 Q} = a_0 \{ \exp(b_0 T) - 1 \} (1 - W/P)^{n1}, \quad (9)$$

где a_0 , b_0 , $n1$ — коэффициенты, определяемые в результате экспериментальных исследований.

Производство метана рассчитывается с использованием уравнения

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4 p}}{1 + \eta C_{O_2}}. \quad (10)$$

Здесь η — параметр, определяющий зависимость производства метана от концентрации кислорода; $V_{CH_4 p}$ — потенциальная скорость производства метана, зависящая от влажности и температуры почвы;

$$V_{CH_4 p} = a_p \{ \exp(b_p T) - 1 \} (W/P)^{n2}, \quad (11)$$

где a_p , b_p , $n2$ — коэффициенты, определяемые в результате экспериментальных исследований.

Поток метана, обусловленный пузырьковым механизмом передвижения, рассчитывался по следующей формуле:

$$Q_b = k_b K C_{CH_4}, \quad (12)$$

где K — коэффициент влагопроводности почвы; k_b — подгоночный коэффициент.

В качестве начального условия для уравнения (1) используется постоянное значение концентрации в профиле:

$$C_{CH_4} = C_{CH_{40}}, \quad t = 0. \quad (13)$$

Нижнее граничное условие отражает тот факт, что на некотором уровне Z (например, минеральное дно болота) поток метана отсутствует:

$$\frac{dC_{CH_4}}{dz} = 0, \quad z = Z. \quad (14)$$

В качестве верхнего граничного условия задается равенство концентрации метана его содержанию в атмосфере:

$$C_{CH_4} = C_{CH_{4a}}, \quad z = 0, \quad (15)$$

где $C_{CH_{4a}}$ — концентрация метана в атмосфере.

В табл. 3 приведены значения основных параметров модели, использованные в расчетах. Пределы изменения влияющих параметров выбирались на основе экспериментальных данных (Jennifer et al., 1998; Wagner et al., 2003). Диапазон изменения глубины сезонного протаивания задавался равным 5—80 см, температура поверхности почвы варьировалась от 5 до 25 °С. Расчетный период времени составлял 2 месяца. Анализировались среднечасовые потоки метана.

Нами было проведено обобщение большого числа проведенных с помощью описанной выше модели расчетов с целью выявления зависимостей потоков метана от глубины протаивания и температуры. В результате удалось установить обобщенное выражение для оценки относительного изменения потока метана в зависимости от глубины протаивания:

$$J_2/J_1 = \sqrt{H_{d2}/H_{d1}}, \quad (16)$$

где J_1 и J_2 — потоки метана за два различных периода времени, H_{d1} и H_{d2} — соответствующие глубины протаивания.

Полученные теоретические результаты были сопоставлены с экспериментальными наблюдениями за потоками метана, глубиной протаивания и температурой почвы, проведенными в 1999 г. в дельте реки Лены (Wagner et al., 2003). С 15 июня по 15 июля глубина протаивания увеличилась с 5 до 20 см. Поток метана увеличился с 2,5 до 5 мг/(см²·ч). Происходили колебания средней суточной температуры поверхности почвы. При этом наблюдался несущественный положительный линейный тренд около 1 °С/мес. Это позволило провести расчет относительного изменения пото-

Таблица 3

Значения основных параметров модели при расчете эмиссии метана

Параметр	Значение	Параметр	Значение
K_{CH_4} (г/м ³)	2,8	b_0 (°C ⁻¹)	0,15
K_{O_2} (г/м ³)	1	$n1$ (б/р)	3
τ_r (б/р)	1,5	a_p (г/(м ³ ·ч))	0,005—0,04
ε (доля объема)	0,01	b_p (°C ⁻¹)	0,16
η (м ³ /г)	12,5	$n2$ (б/р)	3
C_{CH_4a} (г/м ³)	0,003	ρ_{k0} (см ⁻¹)	0,1
C_{CH_4o} (г/м ³)	1,5—15	k_k (б/р)	0,04—0,1
k_b (б/р)	3—30	b_k (б/р)	0,001—0,1
a_0 (г/(м ³ ·ч))	0,1—0,5	Z (см)	5—80

ка метана по уравнению (16), который дал результаты в пределах погрешности измеренных значений.

Подобным образом были также обобщены результаты численных экспериментов по исследованию температурной зависимости потока метана при фиксированной глубине протаивания и получено следующее выражение:

$$J_2 / J_1 = \exp 0,1 (T_2 - T_1), \quad (17)$$

где T_1 и T_2 — температуры поверхности почвы за два различных периода времени. Объединив (15) и (16), обобщенную зависимость можно представить в виде

$$J_2 / J_1 = \exp 0,1 (T_2 - T_1) \sqrt{H_{d2} / H_{d1}}. \quad (18)$$

Важным фактором, влияющим на эмиссию метана, является уровень грунтовых вод. Для того чтобы оценить влияние этой характеристики на поток метана, проводились соответствующие модельные расчеты при стоянии грунтовых вод от 0 до 40 см ниже поверхности почвы. При этом изменение уровня грунтовых вод моделировалось изменением начальной эпюры влажности. В результате обобщения было получено следующее выражение для расчета относительного изменения потока метана при изменении уровня грунтовых вод:

$$J / J_0 = (1 - 0,033h), \quad (19)$$

где J , J_0 — соответственно потоки метана при уровне грунтовых вод h и 0.

Полученные нами в результате численных экспериментов зависимости потока метана от температуры грунта, глубины сезонного протаивания и уровня грунтовых вод в основном соответствуют наблюдаемым в полевых условиях.

Результаты

Сценарии изменения климата, модель вечной мерзлоты и модель углеродного обмена были применены для оценки изменения эмиссии метана из многолетнемерзлых болот в условиях антропогенного потепления. Расчет проводился на основе геоинформационной технологии в узлах регулярной сетки, при этом использовалась вся имеющаяся информация о климатических, почвенных и мерзлотных характеристиках для каждого из узлов, полученная как по данным наблюдений, так и путем расчетов.

Имеющиеся в настоящее время измерения потоков метана из многолетнемерзлых болот крайне немногочисленны и не дают представления об их пространственной и временной изменчивости в пределах криолитозоны России. По этой причине возможно было рассчитать лишь отношение прогнозируемой для условий будущего климата эмиссии метана в многолетнемерзлых болотах к ее современному значению. Для этого была использована полученная нами обобщенная зависимость (18), причем изменение уровня болотных вод при потеплении из-за отсутствия достоверных данных не учитывалось. Результаты расчетов для прогнозируемых по модели GFDL климатических условий середины XXI в. показаны на рис. 4. Показанная на этом рисунке карта была рассчитана для влажности грунта 800 мм/м, однако, как и при расчете глубины протаивания, относительное изменение эмиссии метана практически не зависело от влагосодержания торфяной залежи.

Расчет указывает на то, что увеличение эмиссии метана из многолетнемерзлых болот будет достигать наибольших значений в наиболее холодной части сплошной криолитозоны. На отдельных участках, примыкающих к Арктическому побережью, эмиссия может вырасти более чем на 80 %. Необходимо при этом учитывать, что в этой области ее современная величина незначительна из-за короткого теплого периода и малой глубины сезонного протаивания. На большей части прерывистой криолитозоны прогнозируемое изменение эмиссии метана составит от 30 до 50 %. В наименьшей степени изменения коснутся эмиссии метана в болотах восточной и юго-восточной частей криолитозоны, где, по данным расчета, она увеличится не более чем на 20 %. Именно в этой области, как следует из карты на рис. 3, сосредоточена большая часть многолетнемерзлых болот России. Сравнивая карту на рис. 4 с рис. 2 б, можно отметить, что расчетное изменение эмиссии метана еще более заметно отличается от зонального, чем прогноз глубины сезонного протаивания болот.

При интерпретации представленных на рис. 4 результатов с целью оценить изменение абсолютной величины потоков метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России необходимо учитывать следующие обстоятельства. Прежде всего, при постановке задачи предполагалось, что во всех типах болот криолитозоны мощность торфяной залежи превышает глубину сезонного протаивания. В наиболее холодной области сплошного

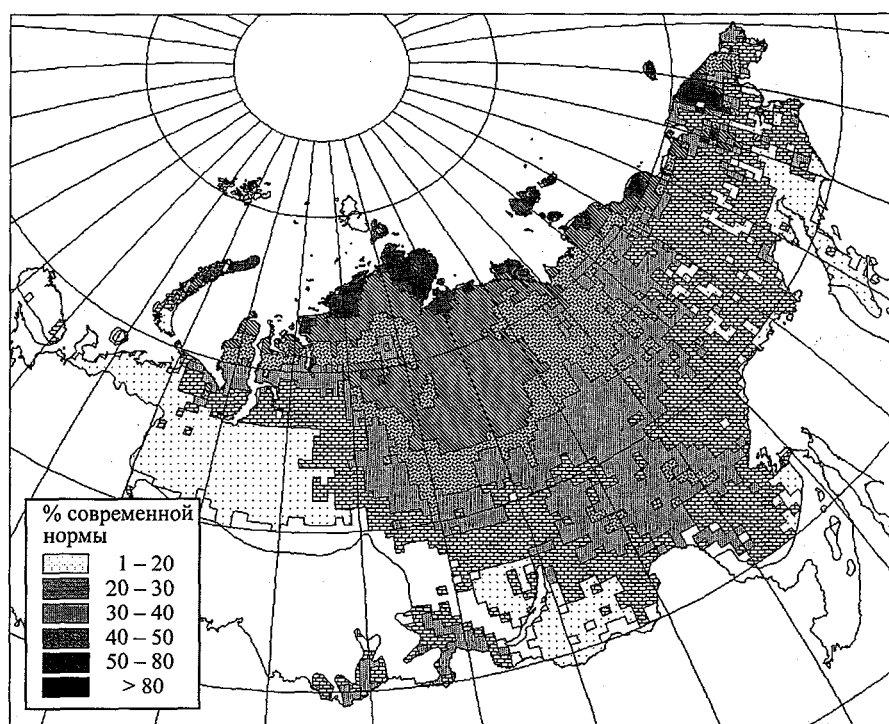


Рис. 4. Прогнозируемое изменение эмиссии метана из многолетнемерзлых болот криолитозоны России для 2050 г. по климатическому сценарию GFDL.

распространения многолетнемерзлых пород глубина сезонного протаивания невелика, и это условие выполняется для большинства болот. Вместе с тем, относительно молодые и вновь формирующиеся болота в этой области могут иметь неглубокий слой торфа, который и при современном климате полностью протаивает в течение теплого периода года. В южной части криолитозоны многие болота летом протаивают полностью. Очевидно, что в таких условиях увеличение глубины сезонного протаивания за счет нижерасположенного минерального грунта само по себе не вызовет заметного усиления эмиссии метана. В этом случае изменение эмиссии будет определяться главным образом повышением температуры, и для его расчета можно воспользоваться уравнением (17).

Еще одно обстоятельство, которое не принималось во внимание в проведенных нами расчетах, связано с учетом просадки грунта при таянии вечной мерзлоты. Следствием просадки тающего грунта является изменение уровня болотных вод. Как показали наблюдения, в верховых болотах на многолетней прерывистой мерзлоте уровень болотных вод располагается на 40 см и более ниже растительного покрова. В развившихся же по-

сле таяния сфагново-осоковых болотах он расположен вблизи поверхности сфагновых мхов. Следствием этого является некоторое увеличение аккумуляции углерода в почвах на растаявшей мерзлоте и значительное повышение интенсивности эмиссии метана ($182,6 \text{ мг CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) по сравнению с болотами на мерзлоте ($40,9 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) и аналогичными болотами, занимающими не мерзлые почвы ($21,1 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российско-Голландского проекта РФФИ-NWO (грант 047.011.2001.003) и проектов РФФИ 04-05-64488 и 03-05-64955-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О. А., Белолуцкая М. А. 2003. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 19. — СПб.: Гидрометеиздат, с. 21—38.

Анисимов О. А., Поляков В. 1998. Информационная система для оценки последствий изменения климата в области криолитозоны. — Криосфера Земли, № 3, с. 91—95.

Будыко М. И., Израэль Ю. А., Маккракен М. С., Хект А. Д. (ред.). 1991. Предстоящие изменения климата. — Л.: Гидрометеиздат. — 270 с.

Вомперский С. Э. 1994. Роль болот в круговороте углерода. — Чтения памяти Ак. В. Н. Сукачева. Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование, ч. XI, с. 5—37.

Израэль Ю. А., Груза Г. В., Катцов В. М., Мелешко В. П. 2001. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий. — Метеорология и гидрология, № 5, с. 5—22.

Кац Н. 1971. Болота земного шара. — М. — 296 с.

Новиков С. М., Усова Л. И. 2002. К оценке площади болот, заболоченных земель и прогнозных запасов торфа на территории Российской Федерации. — Сборник работ по гидрологии, вып. 25, с. 3—10.

Паников Н. С., Глаголев М. В., Кравченко И. К. и др. 1997. Эмиссия метана из верховых болот Западной Сибири в зависимости от характера растительного покрова. — Экологическая химия, т. 6, № 1, с. 59—67.

Паников Н. С., Сизова М. В., Зеленев В. В., Махов Г. А., Наумов А. В., Гаджиев И. М. 1996. Эмиссия CH_4 и CO_2 из болот юга Западной Сибири: пространственное и временное варьирование потоков. — Экологическая химия, № 4, с. 13—24.

Яговкина С. В., Кароль И. Л., Зубов В. А., Лагун В. Е., Решетников А. И., Розанов Е. В. 2003. Оценка потоков метана в атмосферу с территории газовых месторождений севера Западной Сибири с использованием трехмерной региональной модели переноса. — Метеорология и гидрология, № 4, с. 49—63.

Anisimov O. A., Shiklomanov N. I., Nelson F. E. 1997. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models. — Global and Planetary Change, N 3—4, p. 61—77.

Arah J. R. M., Stephen K. D. 1998. A model of the processes leading to methane emission from peatland. — Atmospheric Environment, N 19, p. 3257—3264.

Aselmann I., Crutzen P. J. 1989. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. — *J. Atmos. Chem.*, N 8, p. 307—358.

Barlett K. B., Harriss R. C. 1993. Review and assessment of methane emissions from wetlands. — *Chemosphere*, N 26, p. 261—320.

Dlugokencky E. J., Steele L. P., Lang P. M., Masarie K. A. 1995. Atmospheric methane at Mauna Loa and Barrow observatories: presentation and analysis of in situ measurements. — *J. Geophys. Res.*, N 23, p. 103—123.

Gorham E. 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. — *Ecological Applications*, N 2, p. 182—195.

Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J. et al. (eds.). 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: Cambridge University Press. — 881 p.

Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A. et al. (eds.) 1996. Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: Cambridge University Press. — 572 p.

Jennifer Y. K., William S. R., Shannon K. R. 1998. Methane emission and transport by arctic sedges in Alaska: Results of a vegetation removal experiment. — *J. Geophys. Res.*, N 103 (D22), p. 83—92.

Matthews E., Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. — *Global Biogeochemical Cycles*, N 1, p. 61—86.

Oechel W. C., Hastings S. J., Vourlitis G. et al. 1993. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. — *Nature*, N 361, p. 520—523.

Oechel W. C., Vourlitis G. L., Hastings S. J. 1997. Cold-season CO₂ emission from Arctic soils. — *Global Biogeochemical Cycles*, N 11, p. 163—172.

Shaver G. R., Billings W. D., Chapin F. S. et al. 1992. Global change and the carbon balance of arctic ecosystems. — *BioScience*, N 6, p. 433—441.

Wagner D., Kobabe S., Pfeiffer E. M., Hubberten H. W. 2003. Microbial controls on methane fluxes from polygonal tundra of the Lena delta, Siberia. — *Permafrost and Periglacial Processes*, N 14, p. 173—185.

Whalen S. C., Reeburgh S. W., Kizer K. S. 1991. Methane consumption and emission by taiga. — *Global Biogeochemical Cycles*, N 3, p. 261—273.

Whalen S. C., Reeburgh S. W. 1990. A methane flux transect along the trans-Alaska pipeline haul road. — *Tellus*, N 42B, p. 237—249.

Zimov S. A., Davidov S. P., Voropaev Y. V. et al. 1996. Siberian CO₂ efflux in winter as a CO₂ sources and cause of seasonality in atmospheric CO₂. — *Climatic Change*, N 33, p. 111—120.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В СУБЪЕКТАХ И ФЕДЕРАЛЬНЫХ ОКРУГАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Г. М. Черногаева, А. С. Зеленов

РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии
Росгидромета и РАН, chernogaeva@yandex.ru

Реферат. На основании косвенных статистических данных об антропогенной нагрузке, а также данных мониторинга окружающей среды урбанизированных территорий проведена сравнительная комплексная оценка степени напряженности экологической ситуации, сложившейся в субъектах и Федеральных округах Российской Федерации в условиях современной антропогенной деятельности. Создан банк данных приоритетных показателей загрязнения, разработаны алгоритм и программное обеспечение для расчета комплексной оценки и визуализации результатов расчетов. Анализ результатов расчетов показал, что наиболее напряженная экологическая ситуация в настоящее время характерна для урбанизированных территорий Московской области (включая город Москву), Тульской, Ростовской, Свердловской, Новосибирской областей, Краснодарского края и Республики Башкортостан.

Ключевые слова. Комплексная оценка, экологическая напряженность, антропогенная нагрузка, загрязнение окружающей среды, урбанизированные территории, субъекты и Федеральные округа, Российская Федерация.

INTEGRATED ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION IN PROVINCES AND FEDERAL DISTRICTS OF THE RUSSIAN FEDERATION

G. M. Chernogaeva, A. S. Zelenov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20b, Glebovskaya str.,
107258 Moscow, Russia, chernogaeva@yandex.ru

Abstract. A comparative comprehensive assessment of anthropogenic present-day effect on different provinces and Federal Districts of the Russian Federation was carried out on the basis of both indirect statistical data on anthropogenic impacts and environmental monitoring data from the urbanized territories. A database of priority indices of environmental pollution was created, and algorithms and programs for integrated assessment computations and visualization of the results have been worked out. The results of the analysis

showed that at present the most stressed environmental situation is characteristic of territories of Moscow region (including Moscow), Tula, Rostov, Sverdlovsk, Novosibirsk, Krasnodar regions and Republic of Bashkortostan.

Keywords. Comprehensive assessment, anthropogenic impact, anthropogenic stress, environmental pollution, urbanized territories, Russian Federation, provinces, federal districts.

Введение

Конституция Российской Федерации предписывает совместное ведение охраны окружающей среды и обеспечение экологической безопасности федеральным органам государственной власти и органам государственной власти субъектов РФ (Конституции Российской Федерации, 1993). Хозяйственная и иная деятельность органов государственной власти РФ, органов государственной власти субъектов РФ и органов местного самоуправления, оказывающая воздействие на окружающую среду, должна осуществляться на основе принципов, среди которых обязательными являются: оценка воздействия на окружающую среду при принятии решений об осуществлении хозяйственной и иной деятельности, учет природных и социально-экономических особенностей территорий при планировании и осуществлении хозяйственной и иной деятельности, обеспечение интегрированного и индивидуального подходов к установлению требований в области охраны окружающей среды (Федеральный закон, 2002).

Реализация принципов, установленных Федеральным законом „Об охране окружающей среды”, в значительной степени базируется на данных государственного мониторинга окружающей среды. Под государственным мониторингом окружающей среды понимается комплексная система наблюдения за состоянием окружающей среды, оценки и прогноз изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов (Израэль, 1974, 1984). В основе государственного мониторинга окружающей среды в РФ лежат данные мониторинга состояния атмосферного воздуха, поверхностных вод и почвенного покрова, проводимого подразделениями Росгидромета.

Созданная в 1970-е годы и действующая в настоящее время служба мониторинга природной среды предназначена для решения следующих задач:

- наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы, почв, вод и донных отложений рек, озер, водохранилищ и морей по физическим, химическим и гидробиологическим (для водных объектов) показателям с целью изучения распределения загрязняющих веществ во времени и в пространстве, оценки и прогноза состояния окружающей среды, определения эффективности мероприятий по ее защите;

- обеспечения органов государственного управления, хозяйственных организаций и населения систематической и экстренной информацией об изменениях уровней загрязнения (в том числе и радиоактивного) атмо-

сферного воздуха, почв, водных объектов под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий, а также прогнозами и предупреждениями о возможных изменениях уровней загрязненности;

— обеспечения заинтересованных организаций материалами для составления рекомендаций в области охраны природы и рационального использования природных ресурсов, составления планов развития народного хозяйства с учетом состояния природной среды и других вопросов развития экономики.

В настоящее время на Государственной сети мониторинга окружающей среды, базовую основу которой составляют наблюдательные органы Росгидромета, проводятся следующие основные виды наблюдений:

— за состоянием загрязнения воздуха в городах и промышленных центрах;

— за состоянием загрязнения почв пестицидами и тяжелыми металлами;

— за состоянием загрязнения поверхностных вод суши и морей;

— за трансграничным переносом веществ, загрязняющих атмосферу;

— комплексные наблюдения за загрязнением природной среды и состоянием растительности;

— за химическим составом и кислотностью атмосферных осадков и снежного покрова;

— за фоновым загрязнением атмосферы;

— за радиоактивным загрязнением природной среды.

В основе организации и проведения режимных наблюдений лежат следующие основные принципы: комплексность и систематичность наблюдений, согласованность сроков их проведения с характерными гидрологическими ситуациями и изменением метеорологических условий, определение показателей едиными методиками на всей территории страны.

Система базируется на сети пунктов режимных наблюдений, которые устанавливаются в городах, на водоемах и водотоках как в районах с повышенным антропогенным воздействием, так и на незагрязненных участках.

Результаты анализа данных наблюдений и выводы о сохранении высоких уровней загрязнения атмосферного воздуха в городах РФ и поверхностных вод многих водных объектов являются важным элементом информационной поддержки государственного надзора и контроля за источниками выбросов и сбросов вредных веществ в природную среду.

В настоящее время данные мониторинга обрабатываются и анализируются по отдельным природным средам; для характеристики состояния загрязнения каждой природной среды разработаны и используются комплексные показатели. Как видно из табл. 1, используемые комплексные показатели загрязнения имеют различное количество классов качества. Выбор территориальной единицы для пространственного обобщения данных мониторинга также сильно различается по отдельным природным средам. Все это затрудняет получение единой комплексной оценки загряз-

нения территории РФ в целом, а также по отдельным Федеральным округам и субъектам РФ.

Таблица 1

Классы качества загрязнения природных сред химическими веществами и уровни пространственного обобщения мониторинговых данных

Природная среда	Класс качества (категория загрязнения) ¹		Уровень пространственного обобщения — головные институты
Атмосферный воздух	I	Низкая	Города РФ Субъекты РФ (75) — ГГО
	II	Повышенная	
	III	Высокая	
	IV	Очень высокая	
Почвенный покров	Токсиканты промышленного происхождения	I	Ореолы загрязнения вокруг городов РФ
		II	
		III	
		IV	
	Пестициды	I	Почвы сельхозугодий — субъекты РФ (выборочно) — НПО „Тайфун”
		II	
		III	
		IV	
Поверхностные воды суши	1	Условно чистая	Бассейны крупных рек — ГХИ
	2	Слабо загрязненная	
	3	а) Весьма загрязненная б) Очень загрязненная	
	4	а) Грязная б) Грязная в) Очень грязная г) Очень грязная	
	5	Экстремально грязная	
	I	Очень чистая	
	II	Чистая	
	III	Умеренно загрязненная	
Морские воды	IV	Загрязненная	Шельфовые зоны морей — ГОИН
	V	Грязная	
	VI	Очень грязная	
	VII	Чрезвычайно грязная	

¹ При расчете класса качества (категории загрязнения) по отдельным средам данные мониторинга сопоставляются в каждом отдельном случае с соответствующими государственными нормативами (ПДК, ОДК и др.); при отсутствии разработанных нормативов данные мониторинга сопоставляются с природными фоновыми концентрациями.

В последние годы вопросами создания экологических карт серьезно занимаются различные министерства, ведомства и организации. Однако единой системы экологического картографирования в стране не имеется. В подавляющем большинстве случаев карты определенной экологической направленности создаются эпизодически и решают в лучшем случае отраслевые или частные региональные задачи. Разработки проводятся на различной технической и технологической базе, имеет место дублирование работ, информационное обеспечение не согласовано, что в конечном итоге может привести к невозможности создания единого информационного пространства в органах государственной власти субъектов Российской Федерации.

В 2000 г. в Государственном докладе „О состоянии окружающей природной среды в Российской Федерации в 1999 году” были опубликованы три схемы, на которых было показано распределение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, сброс загрязненных сточных вод в поверхностные воды и накопление твердых объектов по субъектам на душу населения.

В 2002 г. в Институте географии РАН вышла карта „Комплексное районирование территории России по экологической и социально-экономической ситуации” под общей редакцией академика РАН В. М. Котлякова и член-корр. Н. Ф. Глазовского. Карта в масштабе 1:8 000 000 на картографической основе Федеральной службы геодезии и картографии России подготовлена большим коллективом авторов. На карте выделено 56 экологических районов России, ранжированных по степени экологической напряженности (всего семь рангов). Экологическая напряженность региона определяется по соотношению в нем площадей ареалов с различной остротой экологических ситуаций (без учета радиоактивного загрязнения). Экологическая ситуация определяется по региональному набору экологических проблем. Всего рассматривается 27 проблем, объединенных в следующие группы:

- проблемы, оказывающие влияние на здоровье и ухудшение условий проживания населения;
- проблемы, связанные с истощением и утратой элементов природно-ресурсного потенциала;
- проблемы, приводящие к изменениям естественного состояния ценных природных ландшафтов.

Анализ выполненных разработок в области создания экологических карт показывает, что данные мониторинга загрязнения окружающей природной среды Росгидромета, как правило, мало используются при оценках и составлении карт экологической ситуации на территории РФ. В основном используются различные косвенные статистические показатели, прежде всего выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и сброс сточных вод в поверхностные водные объекты без учета тенденций в их изменении

(Государственный доклад, 1999; Экологическая безопасность, 2002; Комплексное районирование, 2002).

Цель настоящей работы — разработка комплексной оценки состояния загрязнения окружающей природной среды по Федеральным округам и субъектам Российской Федерации на основании данных мониторинга Росгидромета и косвенных статистических данных об антропогенной нагрузке, публикуемых в сборниках Госкомстата (Охрана окружающей среды, 2004).

Реализация цели исследования потребовала решения следующих задач:

- анализа существующих информационных потоков данных мониторинга загрязнения природных сред и выбор приоритетных показателей загрязнения для сравнительной оценки по субъектам РФ;

- создания банка данных приоритетных показателей загрязнения окружающей природной среды, включая данные мониторинга и косвенные статистические показатели;

- создания алгоритма расчета комплексной оценки загрязнения окружающей среды в субъектах РФ под влиянием жизнедеятельности городского населения;

- разработки соответствующих программных средств для расчетов и визуализации их результатов;

- получения комплексной оценки состояния загрязнения природных сред с использованием современных информационных технологий;

- сравнения состояния загрязнения окружающей природной среды (это — атмосферный воздух, поверхностные воды и почвенный покров) по субъектам и Федеральным округам РФ с учетом их природных и социально-экономических особенностей.

Методы и материалы

В данной работе были рассмотрены и проанализированы следующие статистические показатели, косвенно характеризующие антропогенную нагрузку на территории субъектов РФ:

- площадь территорий субъектов;
- численность населения, в том числе отдельно городского и сельского;
- плотность населения;
- число городов в субъекте;
- территории, занятые пашней;
- территории, занятые лесами;
- выбросы загрязняющих веществ в атмосферу;
- сброс сточных вод в поверхностные водные объекты.

Первые шесть показателей характеризуют степень хозяйственной освоенности территории субъектов РФ, которая в значительной мере определяет состояние загрязнения природной среды. В качестве приоритетных статистических показателей для комплексной оценки состояния

загрязнения окружающей природной среды по субъектам РФ были рассмотрены два последних показателя: выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и сброс сточных вод в поверхностные водные объекты.

Источником статистических показателей были данные Госкомстата, агрегированные по субъектам и Федеральным округам РФ. Существенная вариация по годам для этих показателей характерна в основном для выбросов и сбросов и в меньшей степени для распаханых площадей.

Анализ данных мониторинга загрязнения окружающей природной среды показывает, что наиболее опасным видом загрязнения является хроническое загрязнение химическими веществами атмосферы, поверхностных вод и почвенного покрова (Израэль, Черногаева, 2001).

Большая часть населения Российской Федерации (73 %) проживает в городах, где выбросами и сбросами загрязняющих веществ промышленными предприятиями, жилищно-коммунальными хозяйствами, автотранспортом загрязнены практически все природные среды. Несмотря на спад производства, который начался в 1991 г., в России не произошло улучшения качества окружающей природной среды, адекватное уменьшению негативной нагрузки (Обзор..., 2004). С 1999 г. наметилась тенденция роста городов, в которых уровень загрязнения атмосферы по показателю ИЗА оценивается как высокий и очень высокий (рис. 1). Список городов с наибольшим уровнем загрязнения воздуха в 2003 г. включал 45 городов, из которых 20 расположены в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке в неблагоприятных климатических условиях (в планетарной зоне Севера) (Ежегодник..., 2004).

Несмотря на уменьшение в целом по стране сбросов сточных вод из-за сокращения объемов производства, состояние качества поверхностных вод остается неудовлетворительным. Ниже городов вода по качеству относится к категории грязной или очень грязной (Москва). Около 70 % случаев высокого и экстремально высокого загрязнения поверхностных вод

связано не столько с аварийными ситуациями, сколько с систематическими сбросами неочищенных сточных вод промышленными предприя-

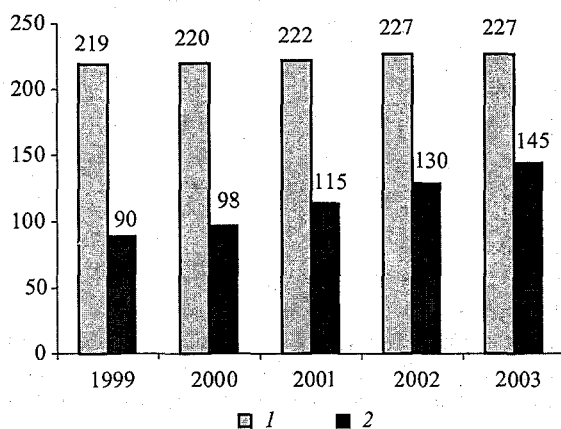


Рис. 1. Число городов, в которых проводились наблюдения за загрязнением атмосферы на сети Росгидромета (1), и число городов с высоким и очень высоким (ИЗА > 7) уровнем загрязнения (2).

тиями и жилищно-коммунальными хозяйствами. В связи с изношенностью основных фондов уровень очистки сточных вод крайне низкий (Государственный доклад..., 2004). Отмечается устойчивая тенденция к росту уровней высокого загрязнения поверхностных вод (ВЗ) (рис. 2). Без принятия дополнительных мер по охране окружающей среды рост производства в ближайшем будущем может привести к существенному увеличению ее загрязнения (Обзор..., 2004).

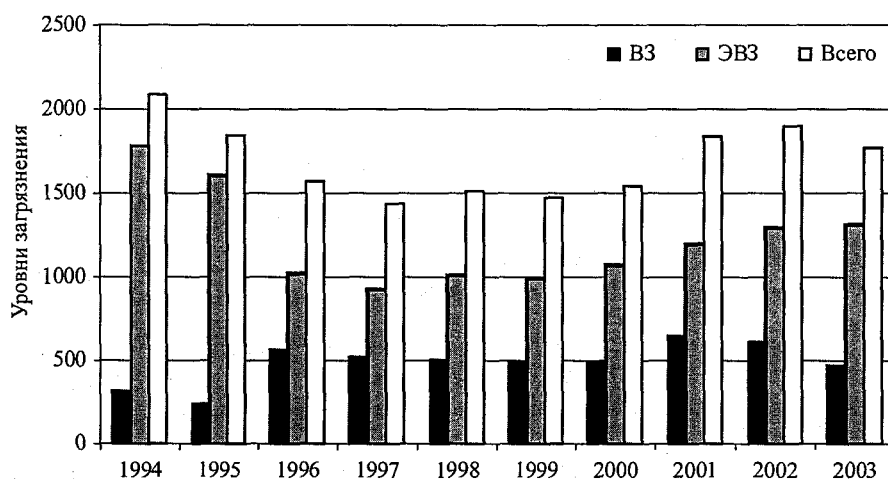


Рис. 2. Число случаев экстремально высоких и высоких уровней загрязнения поверхностных вод на территории России.

Вокруг городов сформировались территории хронического загрязнения почв тяжелыми металлами радиусом до 5—10 км, окислами серы и азота радиусом до 60 км (Норильск). В 1999—2003 гг. в почвах 105 городов среднее содержание валовых или кислоторастворимых форм тяжелых металлов было равно или выше 1 ПДК, 1 ОДК или 4 Ф (в зависимости от принятого критерия) (рис. 3).

В связи с этим в настоящей работе комплексная оценка состояния загрязнения окружающей природной среды по субъектам РФ на основании данных мониторинга Росгидромета проводилась по следующим приоритетным показателям:

- число городов в субъекте РФ с высоким и очень высоким уровнем загрязнения (ИЗА > 7);
- число случаев высокого и экстремально высокого загрязнения (ВЗ и ЭВЗ) в субъектах РФ поверхностных вод, которые для городского населения, как правило, являются источником питьевого водоснабжения;
- хронически загрязненные химическими веществами промышленного происхождения площади, образовавшиеся вокруг городов и отнесенные к площади субъекта.

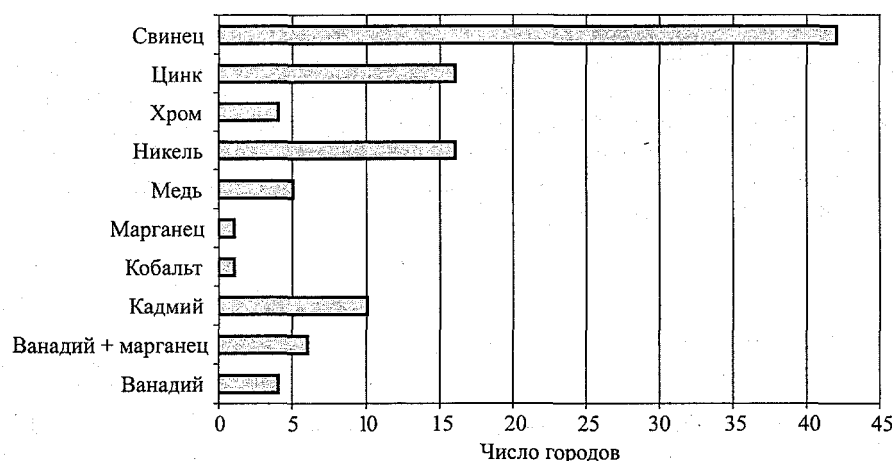


Рис. 3. Число городов, в почвах которых содержание тяжелых металлов превышает норму.

Расчетные показатели по данным мониторинга Росгидромета обновляются ежегодно. Число городов с $ИЗА > 7$ рассчитывается ГУ ГГО Росгидромета по данным режимного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в городах и публикуется в ежегоднике „Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России” и ежегодных „Обзорах загрязнения природной среды в Российской Федерации”. Число случаев высокого и экстремально высокого загрязнения поверхностных вод по данным оперативного мониторинга обобщается и анализируется в ГУ ИГКЭ Росгидромета и РАН и публикуется в ежегодных „Обзорах загрязнения природной среды в Российской Федерации”. Территории, хронически загрязняемые токсикантами промышленного происхождения, рассчитаны по данным космических снимков в ГУ ГГИ Росгидромета (Справочник..., 1992). Для анализа самоочищающей способности поверхностных вод использовался такой косвенный показатель, как разбавление (отношение объема водных ресурсов, ежегодно формирующегося на территории субъекта, к объему сточных вод). Водные ресурсы, ежегодно формирующиеся в субъектах (с учетом транзитного стока), рассчитываются по данным гидрологического мониторинга ГУ ГГИ Росгидромета и публикуются в ежегодных „Водных кадастрах”.

Алгоритм расчета

Каждый из выбранных приоритетных показателей по отдельности был логарифмирован и ранжирован по трем категориям. Категория каждого субъекта РФ определялась по проценту от суммы значений показателя (табл. 2).

Таблица 2

Ранжирование субъектов РФ

Категория	Балл	Процент
Первая	1	≤25
Вторая	2	25—75
Третья	3	>75

Комплексная оценка состояния загрязнения природной среды в субъектах РФ выполнялась для двух групп приоритетных показателей:

- косвенных статистических показателей;
- показателей загрязнения по данным мониторинга Росгидромета.

Для определения комплексной оценки загрязнения по каждой группе показателей, полученные по предыдущим расчетам баллы были просуммированы и ранжированы для каждого субъекта также по трем категориям (табл. 3).

Таблица 3

Ранжирование субъектов РФ

Категория	Балл	Условное название категории	Процент
Первая	1	Низкая экологическая напряженность ¹	≤25
Вторая	2	Средняя экологическая напряженность	25—75
Третья	3	Высокая экологическая напряженность	>75

¹ Под экологической напряженностью понимается уровень загрязнения окружающей среды, сложившийся в результате жизнедеятельности городского населения в субъектах РФ, который может приводить к ухудшению здоровья и условиям жизни населения. Такое определение практически совпадает с определением основных экологических проблем группы „а”, рассмотренных при создании карты ИГ РАН „Комплексное районирование территории России по экологической и социально-экономической ситуации”.

Для удобства интерпретации рассчитанной балльной оценки для каждого приоритетного показателя, а также для комплексной оценки обеих выделенных групп показателей была выполнена графическая визуализация оценки по субъектам и Федеральным округам РФ.

Для реализации алгоритма расчета комплексной оценки состояния загрязнения природной среды было разработано программное обеспечение. Процесс расчета оценки разбит на несколько шагов, каждый из которых требует от пользователя выбора определенных действий. Количество шагов зависит от вида рассчитываемой оценки: четыре шага для ранжирования отдельно приоритетного показателя, пять и более — для получения комплексной оценки (в зависимости от числа приоритетных показателей, входящих в комплексную оценку). На рис. 4 представлен интерфейс про-

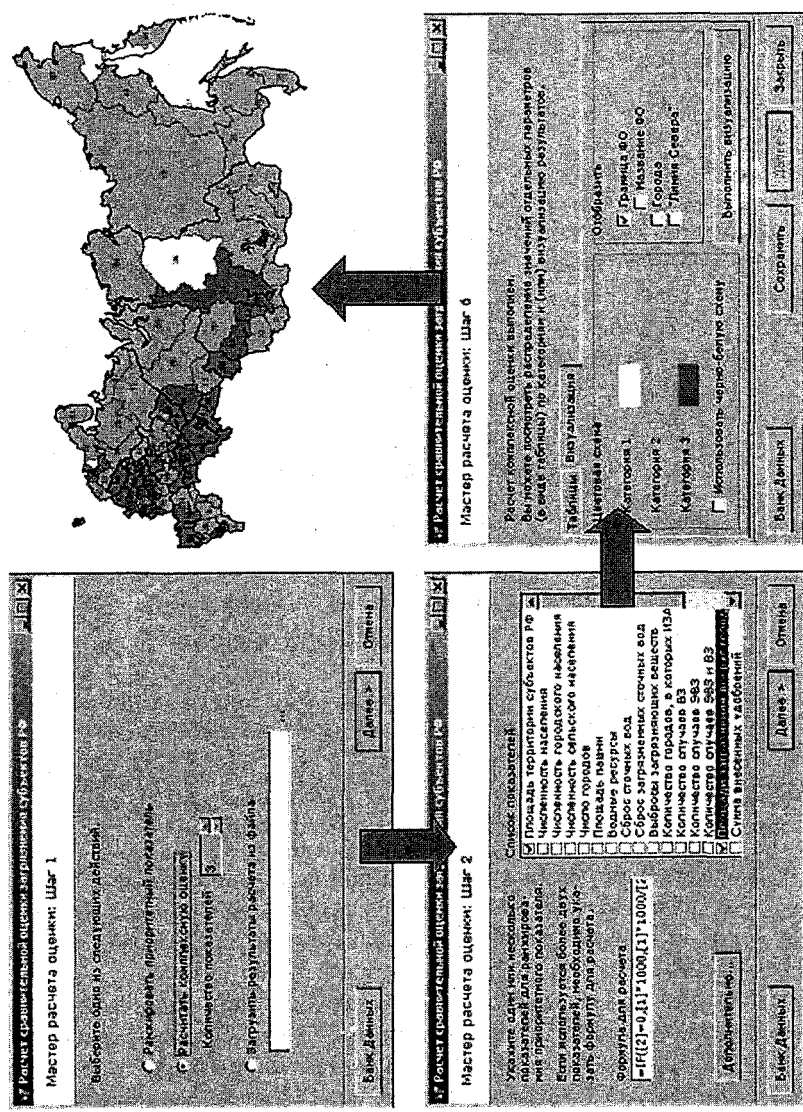


Рис. 4. Интерфейс программы для расчета комплексной оценки.

граммы для получения комплексной оценки состояния загрязнения природной среды.

При сравнении субъектов РФ по антропогенной нагрузке и уровню загрязнения были построены таблицы, характеризующие субъекты РФ по категориям. Для их построения использовались исходные значения статистических показателей, а также приоритетных показателей данных мониторинга Росгидромета. Были рассмотрены зависимости между численностью городского населения и выбросами загрязняющих веществ в атмосферу и сбросами сточных вод в поверхностные водные объекты по субъектам РФ. По данным мониторинга анализировалось загрязнение окружающей среды субъектов РФ, расположенных по обе стороны границы северной географической области, условно обозначающей южный предел зон с дискомфортными природно-климатическими условиями проживания населения.

Предлагаемый подход дает возможность на единой методической основе сравнивать субъекты РФ с учетом степени их урбанизированности, промышленной освоенности и отклика окружающей среды на антропогенную нагрузку по данным мониторинга с учетом токсичности загрязняющих веществ. Безусловно, это генерализованная оценка, однако использованный в работе подход предполагает возможность введения в дальнейшем более объективных показателей и большую пространственную детализацию (административные районы), выделение большего числа категорий при ранжировании.

Результаты

Анализ комплексной оценки состояния загрязнения окружающей среды на урбанизированных территориях (рис. 5) показывает, что 20 субъектов РФ имеют низкий уровень экологической напряженности (первая категория). На территории этих субъектов, суммарная площадь которых 5,5 млн. км² (32,5 % территории России), проживает свыше 10 млн. человек, из них более 6 млн. в городах.

Средний уровень экологической напряженности (вторая категория) определен для 61 субъекта РФ. На территории этих субъектов, суммарная площадь которых 10,8 млн. км² (63 % территории России), проживает около 100 млн. человек, из них 70,5 млн. в городах.

Высокая экологическая напряженность (третья категория) наблюдается в 8 субъектах РФ: Республике Башкортостан, Краснодарском крае, Москве и Московской области, Новосибирской, Ростовской, Свердловской и Тульской областях. На территории этих субъектов, суммарная площадь которых около 800 тыс. км² (4,5 % территории России), проживает 37 млн. человек, из них около 30 млн. в городах. В городах с ИЗА > 7 проживают 18 млн. человек. Характеристика этих субъектов приведена в табл. 4.

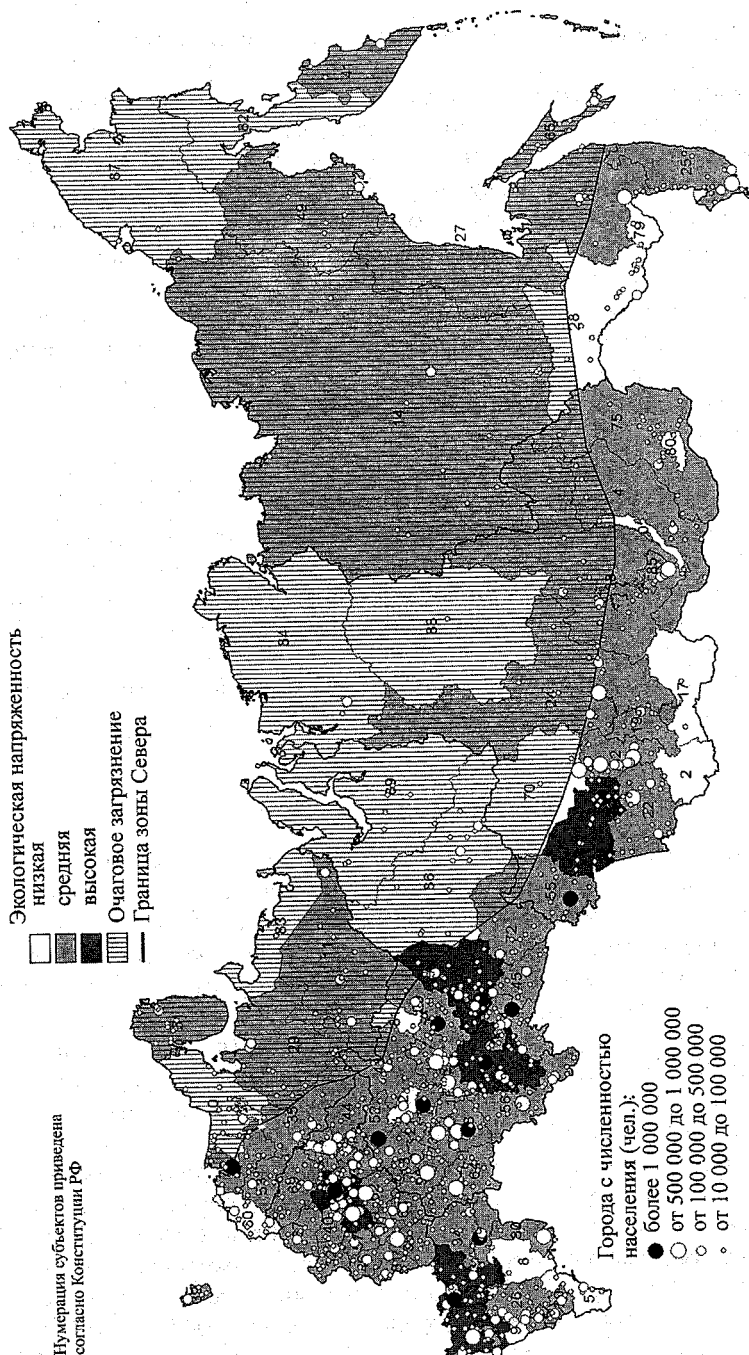


Рис. 5. Комплексная оценка загрязнения субъектов РФ по данным мониторинга Росгидромета.

Таблица 4

Характеристика субъектов РФ с высокой экологической напряженностью на урбанизированных территориях

Субъекты РФ	Площадь территории, тыс. км ²	Число городов	Численность городского населения, млн. чел.	Число городов с ИЗА > 7	Численность населения в городах с ИЗА > 7, млн. чел.	Отношение площади загрязненной территории к площади субъекта, %	Сбор сточных вод, км ³ /год	Разбавление сточных вод ¹	Число случаев ЭВЗ и ВЗ
Москва и Московская область	47,0	75	13,7	8	9,4	69,4	4,2	4,3	69
Ростовская область	100,8	23	2,9	6	1,9	25,7	2,1	9,3	5
Свердловская область	194,8	66	4,0	4	1,9	23,5	1,7	26,2	207
Республика Башкортостан	143,6	21	2,7	6	1,7	11,4	0,6	98,3	5
Новосибирская область	178,2	14	2,0	2	1,5	10,9	0,7	87,6	63
Краснодарский край	76,0	26	2,7	2	1,0	13,6	3,4	7,6	98
Тульская область	25,7	21	1,4	2	0,6	64,2	0,3	32,3	74

¹ С учетом транзитного стока.

Анализ данных табл. 4 показывает, что из восьми субъектов РФ с высокой напряженностью экологической ситуации Московская область, включая Москву, занимает первое место. В этих субъектах, занимающих небольшую территорию (0,3 % площади территории РФ), наблюдается наибольшая в стране концентрация городского населения (91 % общей численности населения в Московском регионе). Данные о численности населения в городах с ИЗА > 7 приведены на рис. 6.

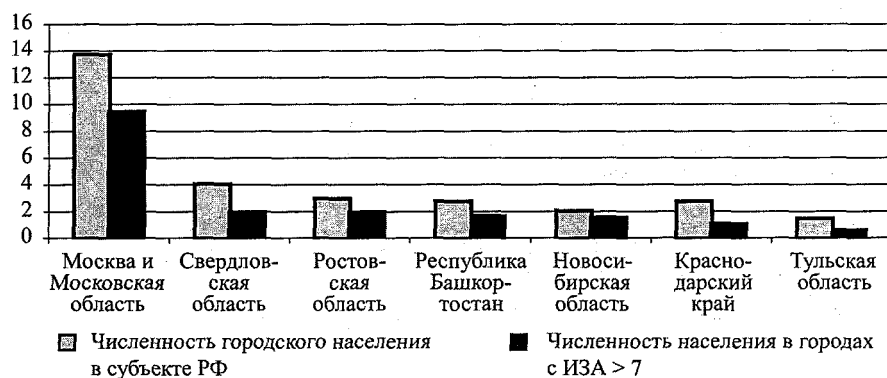


Рис. 6. Численность населения (млн. чел.), проживающего в городах с ИЗА > 7.

Поверхностные воды Московского региона по гидрохимическим характеристикам оцениваются от „умеренно загрязненных” до „очень грязных”. К наиболее грязным относятся реки: Медвенка, Закза, Яуза, Москва (от города Москвы до устья). Это обусловлено сбросом сточных вод с высоким содержанием соединений азота, фенолов, нефтепродуктов, фосфатов, органических веществ, меди и железа. Поступление загрязненных сточных вод, а также несанкционированные — так называемые аварийные — сбросы предприятий таких городов, как Москва, Воскресенск, Коломна, Подольск, Щелково, Серпухов, Электросталь, Мытищи и Дзержинск, являются основными причинами сохранения высокого уровня загрязнения поверхностных вод на протяжении многих лет.

В восьми городах рассматриваемого региона уровень загрязнения атмосферного воздуха оставался, как и прежде, на высоком и очень высоком уровне (ИЗА > 7). В 2003 г. в целом по Москве уровень загрязнения воздуха по ИЗА составил 12,3. Наибольшая повторяемость превышения ПДК достигала 46 %. Качество атмосферного воздуха в городе характеризуется высоким содержанием диоксида азота, формальдегида, бензола, фенола и бенз(а)пирена. Наибольшее загрязнение воздуха отмечалось в Южном округе города: ИЗА = 21. Основной источник загрязнения воздуха связан с автотранспортом, выбросы которого составляют 94 % от общих антропогенных выбросов. Кроме Москвы ИЗА > 7 в 2003 г. наблюдался в Воскре-

сенске, Клину, Коломне, Подольске, Мытищах, Щелково и Электростали. Во всех этих городах в последние годы наблюдается рост концентраций бенз(а)пирена, по токсичности относящегося к первому классу опасности.

Наибольшим отношением площади территории, хронически загрязненной токсикантами промышленного происхождения, к площади территории субъекта в целом, характеризуются Московская (69,4 %) и Тульская (64,2 %) области (рис. 7).



Рис. 7. Площади территорий (тыс. км²) субъектов РФ, хронически загрязняемых токсикантами промышленного происхождения.

Сравнение напряженности экологической ситуации Федеральных округов РФ по выбранным приоритетным показателям показало, что наиболее чистым является Дальневосточный округ. Наиболее напряженная экологическая обстановка на урбанизированных территориях сложилась в Центральном, Приволжском и Сибирском округах. Однако более детальное сравнение показывает, что практически во всех Федеральных округах, кроме Северо-Западного и Дальневосточного, отмечается высокая напряженность экологической обстановки.

Полученная комплексная оценка показала, что в северных районах (более 60 % территории РФ) загрязнение окружающей среды носит очаговый характер. Города вместе с хронически загрязненными территориями вокруг них занимают менее 5 % площади страны. На большей части территории РФ загрязнение связано с трансграничным глобальным и региональным переносом загрязняющих веществ.

Обсуждение

Комплексная оценка загрязнения окружающей среды на урбанизированных территориях в субъектах и Федеральных округах РФ по данным мониторинга Росгидромета была проведена впервые, что не позволяет провести прямое сравнение с результатами других исследований. Как ука-

зывалось выше, другими авторами для расчета антропогенной нагрузки по субъектам РФ используется ряд статистических показателей и, как правило, данные о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, а также о сбросе сточных вод в поверхностные воды. Результаты данной работы показали, что статистические параметры лишь косвенно характеризуют антропогенную нагрузку на территории субъектов и должны применяться с большой осторожностью. Соотнесение же их с численностью населения для субъекта в целом или городов, в частности, не имеет смысла, так как между этими показателями отсутствует зависимость. Следует считать более объективной оценку, полученную на основании данных наблюдений за загрязнением окружающей среды, поскольку обобщение и анализ данных мониторинга, в отличие от статистических данных, проводится с учетом рассеивания примесей в атмосфере, разбавления и самоочищения поверхностных вод и учета токсичности загрязняющих веществ в различных природных средах в соответствии с государственными нормативами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Государственный доклад „О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1999 году”. 2000. — М.: Государственный центр экологических программ, с. 237—239.
- Государственный доклад „О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 2003 году”. 2004. — М.: Государственный центр экологических программ, с. 301—302.
- Ежегодник „Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России”. 2004. — СПб.: Гидрометеиздат. — 214 с.
- Израэль Ю. А. 1974. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга. — Метеорология и гидрология, № 7, с. 3—8.
- Израэль Ю. А. 1984. Экология и контроль природной среды. — М.: Гидрометеиздат. — 560 с.
- Израэль Ю. А., Черногаева Г. М. 2001. Состояние природной среды в Российской Федерации к концу XX в. по данным полувекового мониторинга. — В кн.: Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. — М.: Наука, с. 10—18.
- Комплексное районирование территории России по экологической и социально-экономической ситуации. 2002. — Карта М 1 : 8 000 000. — М.: Институт географии РАН.
- Конституции Российской Федерации, гл. 3 „Федеративное устройство”, ст. 72, п. 1д, 1993.
- Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2003 год. 2004. — СПб.: Гидрометеиздат. — 155 с.
- Охрана окружающей среды в России. 2004. — М.: Госкомстат России. — 228 с.
- Справочник „Зоны хронического загрязнения вокруг городских поселений и вдоль дорог по республикам, краям и областям РФ”. 1992. — СПб. — 188 с.
- Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ „Об охране окружающей среды”, гл. 1 „Общие положения”, ст. 3 „Основные принципы охраны окружающей среды”.
- Экологическая безопасность России. 2002. Вып. 4. Материалы межведомственной комиссии Совета Безопасности РФ по экологической безопасности (сентябрь 1995 г. — апрель 2002 г.). М. — 521 с.

ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕК РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕГО ТЕЧЕНИЯ ДНЕПРА)

Г. М. Черногаева, М. С. Зеленова, Н. О. Кулик

РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, chernogaeva@yandex.ru

Реферат. Основными проблемами в бассейнах трансграничных водных объектов России являются: загрязнение вод, дефицит водных ресурсов в отдельные годы, наводнения, слабая развитость сети мониторинга и недостаток информации. На основании статистических данных, а также данных мониторинга загрязнения окружающей природной среды, рассматриваются трансграничные проблемы верхнего течения Днепра. После образования в 1991 г. независимых государств Российской Федерации, Беларуси и Украины обострилась проблема совместного водопользования и охраны вод и природных наземных экосистем в бассейне Днепра. За последние 10 лет спад производства во всех указанных государствах не привел к заметному улучшению качества окружающей среды, хотя в целом экологическая обстановка в бассейне Днепра оценивается как удовлетворительная.

Ключевые слова. Трансграничные проблемы, водные ресурсы, качество, хозяйственное использование водосбора, бассейн, верхнее течение Днепра.

TRANSBOUNDARY PROBLEMS OF RUSSIAN RIVERS (A CASE OF THE UPPER DNEPR)

G. M. Chernogaeva, M. S. Zelenova, N. O. Kulik

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, chernogaeva@yandex.ru

Abstract. Water pollution, a shortage in water resources in some years, floods, poorly developed monitoring network and lack of information are the main problems in relation to transboundary reservoirs of Russian Federation. Transboundary problems of the upper Dnepr are considered in the paper on the basis of statistical data and environmental pollution monitoring data. After establishing the independent states Russian Federation, Belarus and Ukraine in 1991, the issues of joint use and the protection of reservoirs and terrestrial ecosystems of the Dnepr river basin were challenged. In the past decade a known decline in production has not led to any noticeable improvements in environ-

mental quality, though in general a state of the environment in the basin could be assessed as satisfactory.

Keywords. Transboundary problems, water resources, quality, basin water use, Upper Dnepr river.

Введение

В настоящее время в России насчитывается больше 1000 трансграничных рек, пересекающих границы с Норвегией, Финляндией, Польшей, Беларусью, Украиной, Грузией, Азербайджаном, Казахстаном, Монголией и Китаем.

Наиболее крупными из них на территории страны являются Десна, Сейм, Днепр, Северный Донец, Терек, Тобол, Ишим, Иртыш, Селенга, Аргунь, Амур и ряд других.

Бассейны трансграничных рек, в основном густонаселенные, с развитым промышленным и сельскохозяйственным производством, подвержены значительной антропогенной нагрузке, как и большинство водных бассейнов России.

Основными проблемами трансграничных водных объектов являются: загрязнение вод, дефицит водных ресурсов в отдельные годы и период года, наводнения, слабо развитая сеть пунктов мониторинга и недостаток информации.

В связи с распадом СССР увеличились проблемы использования и охраны трансграничных водных объектов. Россия граничит с 14 государствами, при этом 7141 км границы проходит по рекам (Амур, Аргунь, Уссури, Самур, Неман, Туманная), 475 км — по озерам (примерно 30 озер, наиболее крупные из них — Псковско-Чудское и Ханка) (Голубицкая, Санин, 2001). Трансграничные водные объекты интенсивно используются для водоснабжения, судоходства, энергетики, орошения, рыбного хозяйства.

В рамках двусторонних межправительственных соглашений, а также в рамках соглашений между странами СНГ на 49 водных объектах в 60 пунктах на границе России с сопредельными государствами — подразделениями Росгидромета проводится режимный мониторинг качества и количества водных ресурсов. На основании данных мониторинга рассчитывается водный сток и количество химических веществ, переносимых отдельными реками через границы сопредельных государств. В список приоритетных показателей входят такие, как органические вещества, биогенные, тяжелые металлы, нефтепродукты, фенолы, СПАВ и пестициды.

Однако, как отмечено выше, количество проблем значительно больше, чем изменения гидрологического режима и транзитный перенос загрязняющих веществ. Для каждой конкретной реки список приоритетных пограничных проблем существенно варьирует. В данной работе трансграничные

проблемы анализируются на примере верхнего течения Днепра (российская часть Днепра). Проблемы совместного использования реки Россией, Беларусью и Украиной остро встали в 1991 г. в связи с распадом СССР.

Данное исследование выполнено в рамках проекта Программы ПРООН — ГЭФ экологического оздоровления бассейна Днепра (Васенко, Черногаева, 2003).

Методы и материалы

Информационной базой явились официальные статистические материалы, ежегодники, годовые национальные доклады и годовые обзоры загрязнения природной среды в РФ и субъектах РФ, территориально расположенных (частично или полностью) в бассейне верхнего течения Днепра (Государственные доклады ..., 1995—2001; Государственные водные кадастры, 1990—2001; Ежегодник „Регионы России”, 2001).

Для анализа и обработки исходных материалов использовались статистические методы. Расчет водосборных площадей и площадей лесов в бассейне Днепра и его притоков на территории России проводилось с помощью планиметрирования карт масштаба 1 : 100 000 и 1 : 200 000. Качество поверхностных вод на отдельных речных участках и пограничных створах оценивалось по данным мониторинга с помощью гидрохимического индекса загрязнения воды (ИЗВ):

$$\text{ИЗВ} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{\text{ПДК}_i},$$

где C_i — концентрация приоритетного показателя, ПДК_i — предельно допустимая концентрация i -го вещества по рыбохозяйственным нормативам.

Рассчитанное значение ИЗВ нормировалось по 7 классам качества воды (табл. 1).

Таблица 1

Классы качества вод в зависимости от значения индекса загрязнения воды

Воды	Значения ИЗВ	Класс вод
Очень чистые	До 0,2	1
Чистые	0,2—1,0	2
Умеренно загрязненные	1,0—2,0	3
Загрязненные	2,0—4,0	4
Грязные	4,0—6,0	5
Очень грязные	6,0—10,0	6
Чрезвычайно грязные	>10,0	7

Что касается трансграничного переноса загрязняющих веществ по Днепру и его притокам, то здесь следует отметить прежде всего отсутствие как общей согласованной методики расчета для трех государств, так и национальных методик. Все существующие подходы позволяют судить только о порядке величины. При подобных расчетах затруднительно вычленив природную составляющую в переносе, а если судить о переносе по статистической отчетности по сбросам загрязняющих веществ, то возникнет проблема сложности оценки диффузного поступления загрязняющих веществ в речной сток с загрязненных территорий водосборов.

В связи с вышеизложенным в данной работе была сделана попытка оценить допустимый (с точки зрения самых жестких рыбохозяйственных ПДК) сток веществ, среднегодовые концентрации которых в предыдущие годы превышали рыбохозяйственные ПДК. Расчеты проводились для водности среднего многолетнего уровня:

$$M_i = C_{i_{p/x}} W,$$

где M_i — масса i -го вещества в трансграничном створе, $C_{i_{p/x}}$ — рыбохозяйственный ПДК i -го вещества, W — среднемноголетний объем годового стока в трансграничном створе.

Полученные таким образом результаты расчетов могут гарантировать соблюдение рыбохозяйственных ПДК по указанным веществам в трансграничных створах на среднегодовом уровне в многоводные и близкие к средним многолетним по водности годы. Для регулирования качества воды в трансграничных створах необходимо создание методики по оценке трансграничного переноса загрязняющих веществ.

Кроме того, трансграничный перенос был рассчитан для рек бассейна верхнего течения Днепра по данным Росгидромета за пятилетний период. Расчет трансграничного переноса выполнен по формуле

$$M_{ij} = \bar{C}_{ij} V_j,$$

где M_{ij} — объем переноса i -го загрязняющего вещества за j -й год (т), $\bar{C}_{ij}$ — средняя концентрация i -го загрязняющего вещества в расчетном створе за j -й год (г/м³), V_j — объем стока за j -й год (млн. м³).

Средняя концентрация i -го загрязняющего вещества за j -й год в расчетном створе определялась по формуле

$$\bar{C}_{ij} = \frac{\sum_k \sum_{n=1}^{N_k} c_{nk}^{ij}}{\sum_k N_k^{ij}}$$

как среднее арифметическое по всем пробам, отобранным за этот год во всех пунктах отбора проб данного водного объекта; N_k — число проб, отобранных в k -м пункте отбора. Число пунктов отбора для различных рек изменяется от одного (например, река Днепр — город Смоленск) до трех (река Сейм).

Результаты

Экологические проблемы третьей по величине реки в Европе — Днепра — складывались на протяжении столетий в процессе формирования и расселения трех славянских народов: российского, белорусского и украинского. За всю свою историю Днепр только в период существования СССР не был трансграничной рекой. С момента образования в 1991 г. трех независимых государств: Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Украины — Днепр снова стал трансграничной рекой. Экологические проблемы, сложившиеся к этому времени, обострились в связи с экономическим кризисом, охватившим эти государства (Михеев и др., 2003).

В условиях кризиса в административных областях бассейна верхнего течения Днепра, также как и в России в целом, прогрессировала экологическая деградация хозяйственной структуры. В промышленном комплексе исследуемых областей заметно увеличилась роль энергоемких и материалоемких отраслей (топливной промышленности, электроэнергетики, металлургии) и уменьшилась доля экологически более приемлемых производств (легкой промышленности, машиностроения). Сократилось высокотехнологичное и наукоемкое машиностроение, определяющее технический прогресс, в том числе в экологической сфере. За 1990-е годы энергоемкость валового внутреннего продукта увеличилась на 20 %, его водоемкость — на 22 %, а удельный сброс загрязненных сточных вод — на 33 %. Такие показатели свидетельствуют о трудности внедрения ресурсосберегающих технологий в перспективе (Охрана окружающей среды ..., 2001).

Из 509 тыс. км² бассейна Днепра в целом на российскую территорию приходится пятая часть (101 800 км²). При этом более 90 % российской части бассейна Днепра расположено в трех областях: Смоленской (57 % площади области), Брянской (100 %) и Курской (97 %). Остальная площадь верхнего течения Днепра в Российской Федерации (10 %) приходится на Орловскую, Белгородскую и Калужскую области (рис. 1).

Смоленская, Брянская и Курская области имеют выгодное географическое положение: через них проходят транспортные пути из Москвы в Беларусь, Прибалтику, страны Центральной и Западной Европы. Области располагают значительными запасами минерально-сырьевых ресурсов: это бурые угли, торф, фосфориты, месторождения строительных материалов, запасы сульфатно-кальциево-магниевых минеральных вод (Голубицкая, Санин, 2001).

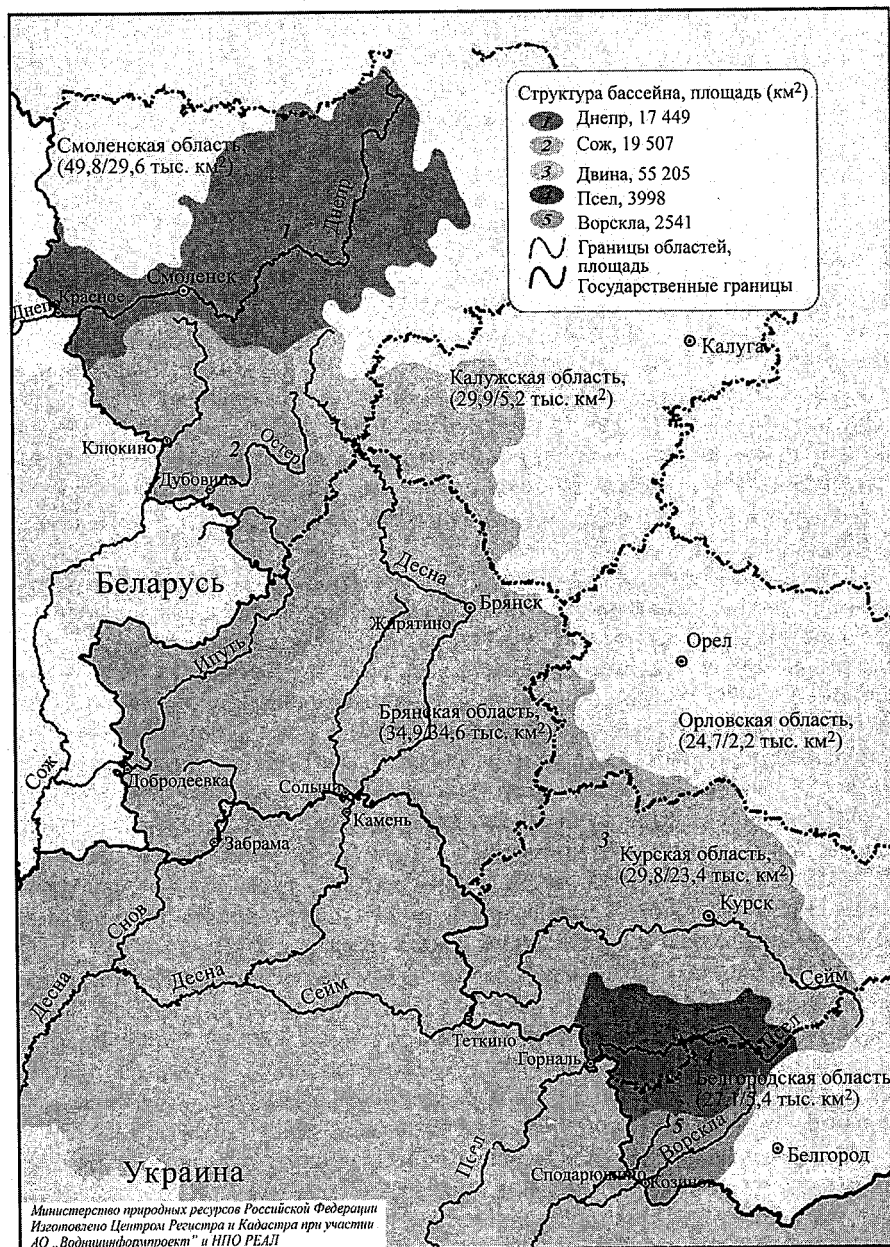


Рис. 1. Бассейн Днепра в Российской Федерации.

Основные направления промышленности в регионах: химическая, легкая, пищевая, электроэнергетика, машиностроение и металлообработка, производство строительных материалов. Развита лесная и деревообрабатывающая отрасли. К наиболее крупным предприятиям энергетики относятся Смоленская АЭС, Сафоновское шахтоуправление, Смоленскторф. Основу сельского хозяйства составляют мясомолочное животноводство и растениеводство (основные промышленные культуры — лен и картофель).

В структуре промышленного комплекса Брянской области основное место занимает продукция машиностроения и металлообработки (31 %). Развита пищевая промышленность (29 %), производство строительных материалов (10 %), электроэнергетика (8 %).

Курская область расположена на территории Курской магнитной аномалии — крупнейшего в мире железорудного бассейна. Железные руды добываются Михайловским горнообогатительным комбинатом, расположенном на реке Свапа — притоке реки Сейм. Разведаны и оценены запасы мела, фосфоритов, формовочных песков, керамических глин. Основные направления промышленности в области: горнодобывающая, машиностроение и металлообработка, стекольная, химическая, легкая, пищевая. Электроэнергетика представлена Курской АЭС.

Представленные в табл. 2 данные о распределении по категориям хозяйственной деятельности населения на рубеже XX—XXI вв. (1999—2000 гг.) отражают достаточно широкий спектр видов использования территории и природных ресурсов, что оказывает существенное влияние на формирование современной экологической обстановки (Государственные доклады ..., 1999—2000).

Кризис в производстве отрицательно сказался на социальной, демографической и экологической ситуациях. Кризисные явления имеют территориально дифференцированный характер (Россия и ее регионы, 2001). Так, в Смоленской области уровень производства в материальной сфере и промышленности выше, чем в сфере услуг; в Брянской, наоборот, выше уровень в сфере услуг. Что касается сельского хозяйства, то в большинстве областей верхнего течения Днепра уровень производства выше, чем в среднем по России, а износ фондов в целом ниже. Самая высокая степень износа характерна для Брянской области.

Рассматриваемые области входят в самую многочисленную группу субъектов РФ с уровнем экономического развития 0,50—0,75 от среднероссийского.

Спад производства, продолжавшийся последние 10 лет во всех областях хозяйства, за исключением отдельных отраслей, в бассейне верхнего течения Днепра, так же как и в Российской Федерации в целом, не привел к заметному улучшению качества окружающей среды к 2000 г. (Израэль и др., 2003).

Таблица 2

Основные характеристики областей, территории которых входят в бассейн верхнего течения Днепра

Область	Площадь, тыс. км ²	Население, тыс. чел.	Средняя плотность населения, чел/км ²	Преобладающие отрасли промышленности	Отраслевая направленность сельского хозяйства
Белгородская	27,1	1469,1	54,2	Переработка сырья, машино- строение, химическая, легкая, пищевая	Земледелие (зерновые, кормо- вые культуры, картофель, ово- щеводство), мясомолочное жи- вотноводство, свиноводство
Брянская	34,9	1479,9	42,2	Легкая, пищевая, машиностро- ение, металлообрабатываю- щая, переработка сырья, хими- ческая, топливно-энергетичес- кий комплекс, производство стройматериалов	Мясомолочное животновод- ство, свиноводство, птицевод- ство
Калужская	29,9	1097,3	36,7	Машиностроение, легкая, пи- щевая, переработка сырья, хи- мическая, лесная, деревопере- рабатывающая, целлюлозно- бумажная, топливно-энергети- ческий комплекс, производ- ство стройматериалов	Земледелие (зерновые, кормо- вые культуры, картофель, ово- щеводство), молочное живот- новодство, свиноводство, о- вцеводство

Курская	29,8	1346,9	45,2	Машиностроение, химическая, нефтехимическая, переработка сырья, легкая, пищевая	Земледелие (зерновые, кормовые культуры, картофель, овощеводство), мясомолочное животноводство, свиноводство, овцеводство, птицеводство
Орловская	24,7	914,0	37,0	Машиностроение, металлообрабатывающая, легкая, пищевая, переработка сырья, топливно-энергетический комплекс	Земледелие (зерновые, кормовые, технические культуры, картофель, овощеводство), мясомолочное животноводство, свиноводство, овцеводство
Смоленская	49,8	1172,4	23,5	Машиностроение, химическая, легкая, пищевая	Мясомолочное животноводство, свиноводство, коневодство, земледелие (зерновые, технические культуры, картофель)

Территориальное размещение водных ресурсов Днепра и функциональная структура производственных сил, сложившаяся в советский период, обусловили деление бассейна на зону формирования стока с незначительным хозяйственным потреблением (Россия, Беларусь) и зону транзита стока (Украина ниже Киева) с малой приточностью и большим спросом на воду. Основная доля стока Днепра формируется на территории России и Беларуси.

Гидрографическая сеть бассейна Днепра является зеленым коридором для миграции перелетных птиц и других наземных и водных организмов. Территория бассейна охватывает разные природные зоны и провинции, что обусловило формирование большого популяционного, видового, ценоотического и геосистемного богатства. Наличие в бассейне Днепра сильно обводненных и заболоченных пойм рек и низинных болот определяет международную значимость данного региона для сохранения биоразнообразия.

Сотни рек, больших и малых, являющихся левыми притоками Днепра в его верхнем течении, дренируют водораздельные пространства названных выше областей, пополняя при этом водный баланс главной водной артерии. Среди них: Десна, Сож, Болва, Снежеть, Навля, Нерусса, Судость, Ипуть, Беседь, Сейм, Тускарь, Плут, Рать, Псел, Ворскла и др.

На территории бассейна верхнего течения Днепра средний многолетний сток изменяется от 220—240 мм в верховьях собственно Днепра до 90—100 мм в верховьях рек Псел и Ворскла. От 60—65 % годового стока в северных районах и до 70 % и более в южных приходится на сток половодья, составляя соответственно от 135—145 до 65—75 мм. В соответствии с зональными закономерностями распределения осадков и стока в бассейне верхнего течения Днепра наибольшая обеспеченность водными ресурсами характерна для Калужской и Смоленской областей (Коронкевич, 1990; Черногаева и др., 2004).

Средний многолетний сток, формируемый в бассейне верхнего течения Днепра, составляет 15,503 км³ в год, снижаясь в маловодный год до 10,724 км³. В настоящее время на водопотребление расходуется около 0,2 км³ в год поверхностных и подземных вод, причем только 14 % этого объема приходится на поверхностные воды. На хозяйственно-питьевые нужды тратится примерно 87 % всего потребляемого объема воды (Израэль и др., 2003).

Существенных изменений в объемах хозяйственно-питьевого водоснабжения за последние 10 лет не произошло, в связи с тем что численность населения и уровень бытового водопотребления практически не изменились.

В табл. 3 сопоставляются объемы водопотребления на промышленные и сельскохозяйственные нужды.

Из таблицы следует, что за последние 10 лет промышленное и сельскохозяйственное водопотребление сократилось более чем в два раза.

Таблица 3

**Использование свежей воды (млн. м³) для промышленного и сельскохозяйственного водопотребления
по субъектам РФ**

Субъекты РФ	1990 г.		1995 г.		2000 г.	
	Промышленное водопотребление	Сельскохозяй- ственное водоснабжение и орошение	Промышленное водопотребление	Сельскохозяй- ственное водоснабжение и орошение	Промышленное водопотребление	Сельскохозяй- ственное водоснабжение и орошение
Брянская область, в том числе Брянск	106,91 46,07	53,31 0,00	52,90 24,52	25,1 0,00	34,91 14,88	11,53 0,02
Смоленская область, в том числе Смоленск	206,99 19,90	26,38 0,00	144,50 13,11	20,87 0,02	118,62 9,33	4,69 0,01
Курская область, в том числе Курск	268,40 121,97	37,66 0,10	207,08 99,78	33,37 0,07	122,34 10,06	15,77 0,17
Калужская область	3,32	3,20	1,98	2,57	2,34	0,53
Белгородская область	8,29	39,15	6,17	16,01	4,07	7,30
Орловская область	0,78	1,28	0,75	0,96	0,72	0,24
Итого	594,70	160,97	413,38	98,88	282,99	40,06
Всего	755,67		512,26		323,05	

За последние 10 лет водоотведение сократилось в 1,5 раза, что существенно меньше, чем сокращение промышленного и сельскохозяйственного водопотребления. Отмеченное различие объясняется тем, что хозяйственно-бытовая составляющая водоотведения практически осталась без изменений.

За прошедшие 10 лет сокращения объемов оборотного водоснабжения не наблюдалось. Это связано с тем, что основная часть оборотного водоснабжения находится в электроэнергетике, а производство этой отрасли не претерпело существенных изменений (Голубицкая, Санин, 2001).

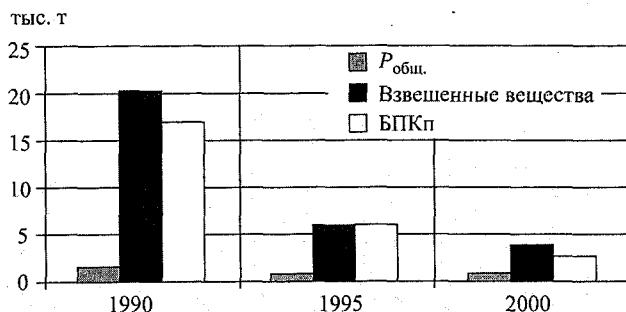
Таким образом, к 2000 г. забор воды из природных водных объектов в бассейне верхнего течения Днепра снизился по сравнению с 1990 г. на 366 млн. м³. Сброс сточных вод в природные водные объекты за этот период снизился на 195 млн. м³. При этом в 1990 г. доля загрязненных сточных вод в общем сбросе составляла 51 %, а в 2000 г. — 58 %.

За последние 10 лет сосредоточенный сброс загрязняющих веществ в связи со спадом производства существенно уменьшился (рис. 2).

Расчеты ИГРАН показали, что в результате уменьшения площади распахиваемых территорий, количества вносимых удобрений и резкого уменьшения поголовья скота за последние 10 лет сократился вынос с поверхностным стоком с водосбора верхнего течения Днепра азота в три раза, фосфора в полтора раза. Вынос взвешенных веществ изменился незначительно — в 1,3 раза (Антропогенное воздействие ..., 2003).

Сравнение поступления загрязняющих веществ от точечных и диффузных источников загрязнения речных вод показывает, что в настоящее время в бассейне верхнего течения Днепра около 90 % азота и фосфора и более 90 % взвешенных веществ могут поступать с поверхностным стоком с водосбора (Черногаева, 1998; Черногаева и др., 2003).

Как следует из данных мониторинга Росгидромета и территориальных управлений природных ресурсов МПР России, приоритетными загрязняющими веществами российской части бассейна реки Днепр являются биогенные и взвешенные вещества. Подобный состав приоритетных загрязняющих веществ обычно соответствует коммунально-бытовому и сельскохозяйственному загрязнению.



В связи с тем что, как отмечалось выше, в последние годы объемы сточных вод и сбросы

Рис. 2. Динамика сброса загрязняющих веществ в бассейне верхнего течения Днепра.

загрязняющих веществ в водные объекты заметно уменьшились, наметилась тенденция к стабилизации уровней загрязнения верхнего течения Днепра и его притоков. Однако они остаются по-прежнему довольно высокими ниже городов и поселков городского типа и не соответствуют по ряду показателей государственным нормам, что объясняется крайне низкой эффективностью природоохранных мероприятий и уменьшением их финансирования.

Расчет ИЗВ показывает, что в настоящее время его значения для Днепра и его притоков изменяются от 1,0 до 2,0, что в соответствии с классификацией табл. 1 позволяет характеризовать воды как умеренно-загрязненные. Данные о среднегодовом массопереносе за период 1995—2000 гг. приведены в табл. 4. С речным стоком Днепра и его притоков на территорию сопредельных государств больше всего переносится минеральных и взвешенных веществ. Однако пересчет значений годового массопереноса на концентрации сульфатов, хлоридов и других анионов и катионов показывает, что в среднем за год превышения рыбохозяйственных ПДК не отмечается.

Таблица 4

Сводные данные о массопереносе (т/год) через границу Российской Федерации в бассейне верхнего течения Днепра

Показатель	Река							Общий массоперенос
	Днепр	Ипуть	Десна	Сейм	Псел	Ворскла	Ворсклица	
Взвешен. в-ва	31 121	34 138	58 482	24 185	8 168	2 556	1326	159 976
Сульфаты	75 948	25 613	66 631	79 775	47 142	16 004	2312	313 425
Хлориды	57 687	13 310	48 132	45 554	20 962	15 192	951,7	201 789
ХПК	69 501	40 806	66 822	40 082	12 446	2 820	1168	233 645
БПК ₅	9 479	3 943	7 543	4 340	1 459	445,5	163,2	27 373
Нефтепродукты	—	0	0	156,7	30,87	14,50	6,04	208,1
Фенолы	5,96	0	0	1,43	0,774	0,510	—	2,714
СПАВ	397,3	1,91	0	77,93	49,62	4,535	9,575	132,7
Азот минеральный	5914	931,6	1829	1890	604,1	188,8	51,38	4563
Фосфор общий	458,9	179,5	360	783	267,7	62,74	29,18	2238
Железо общее	955,1	310,8	1022	261,2	95,89	54,82	20,30	1454
Медь	0,0	0,0	39,42	3,932	2,506	0,486	0,000	46,34
Цинк	—	0,0	18,64	3,435	11,73	1,376	0,000	35,18
Хром 6+	—	0,0	0	6,587	1,122	0,200	0,000	7,909

Обсуждение

В трансграничных створах с Беларусью и Украиной речную воду по ее среднегодовым гидрохимическим показателям можно классифицировать как умеренно-загрязненную. Однако в течение года концентрации ряда загрязняющих веществ (это легко окисляемые органические вещества по БПК₅, железо общее, ионы аммония) могут довольно существенно различаться и превышать рыбохозяйственные ПДК, что прежде всего обусловлено особенностями конкретного года и природными особенностями водосборов. В связи с этим уменьшение переноса загрязняющих веществ по Днепру и его притокам с территории России в Беларусь и Украину является одной из приоритетных трансграничных проблем. К трансграничным проблемам бассейна Днепра следует отнести также воздушный перенос загрязняющих веществ с территорий Беларуси и Украины на российскую часть бассейна Днепра, необходимость уменьшения ущерба от половодий и паводков, а также сохранения и реконструкции зеленых коридоров для миграции птиц и других организмов.

В перспективе решение экологических проблем будет обусловлено в первую очередь финансовыми возможностями государства и его субъектов. С учетом современной ситуации на территории верхнего течения Днепра на успешное и полное решение указанных проблем в ближайшее время рассчитывать не приходится. Демографическая и экологическая ситуации по сложности останутся на уровне 2000 г., поскольку, по прогнозам экономистов, развитие социальной сферы и повышение уровня жизни населения составит 90 % уровня 1990 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия. 2003. — М.: Наука. — 367 с.
- Васенко А. Г., Черногаева Г. М. 2003. Доклад о состоянии окружающей среды в бассейне Днепра: цель и задачи. — Информационный бюллетень Программы ПРООН-ГЭФ экологического оздоровления бассейна Днепра, № 5, Оттава, Канада, с. 12—15.
- Голубицкая М. В., Санин И. И. 2001. Социально-экономическое положение регионов России (оценка современного состояния, проблемы, перспективы). — М.: „Са-турн-С“. — 151 с.
- Государственные доклады о состоянии окружающей природной среды Российской Федерации за 1995—2001 годы. — М. — 540 с.
- Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество за 1990—2000 годы. — СПб.: Гидрометеониздат, с. 1—90.
- Ежегодник „Регионы России“. Госкомстат России. 2001. — М., с. 1—700.
- Израэль Ю. А., Михеев Н. Н., Черногаева Г. М. 2003. Водные ресурсы Верхнего Днепра и их качество. — В кн.: Тезисы докладов „Всероссийского Конгресса работников водного хозяйства“. — М., с. 24—27.
- Коронкевич Н. И. 1990. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. — М.: Наука. — 205 с.

Михеев Н. Н., Комаров И. К., Черногаева Г. М. и др. 2003. Днепр: проблемы и перспективы. — В кн.: Тезисы докладов „Всероссийского Конгресса работников водного хозяйства”. — М., с. 35—39.

Обзоры загрязнения природной среды в Российской Федерации за 1994—2001 годы. — М.: Росгидромет, с. 1—250.

Охрана окружающей среды в России. Госкомстат России. 2001. — М., с. 1—228.

Россия и ее регионы. Внешние и внутренние экологические угрозы. 2001 / Под ред. Н. Н. Клюева. — М.: Наука. — 214 с.

Черногаева Г. М. 1998. Поступление загрязняющих веществ с поверхностным стоком с территории городов. Временные методические рекомендации по прогнозированию химического состава поверхностных вод с учетом перераспределения. — Л.: Гидрометеиздат, с. 11—13.

Черногаева Г. М., Зеленова М. С., Кулик Н. О. 2003. Экологическое состояние Верхнего Днепра и его бассейна и прогноз на ближайшую перспективу. — В кн.: Экологические проблемы в бассейне крупных рек. — 3. — Тольятти, с. 305—306.

Черногаева Г. М., Зеленова М. С., Кулик Н. О. 2004. Качество поверхностных вод России, состояние и прогноз. — В кн.: Использование и охрана природных ресурсов в России. Информационно-аналитический бюллетень, № 4. — М., с. 34—37.

**СООТНОШЕНИЕ НЕТТО- И ГРОСС-ПРОДУКЦИИ
И ГАЗООБМЕН CO_2
В ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ СОСНЯКАХ И БЕРЕЗНЯКАХ**

Ю. Л. Цельникер, А. Г. Молчанов

143030 Московская область, с. Успенское, Институт лесоведения РАН, Yudif@rambler.ru.

Реферат. Исследования проводились в высокопродуктивных 40-летних сосняке и березняке Ярославской области ($57^\circ 47'$ с. ш., $38^\circ 37'$ в. д.). На основании измерений интенсивности фотосинтеза и поглощения солнечной радиации древостоями была рассчитана их годовая gross-продукция (GPP). Нетто-продукцию (NPP) определяли двумя методами: лесоводственным — по приросту массы всех органов деревьев и физиологическим — по разности между поглощением CO_2 при фотосинтезе и выделением при дыхании всех органов дерева. Интенсивность дыхания листьев ночью и тонких корней определяли непосредственно, а стволов, ветвей и скелетных корней рассчитывали по коэффициентам дыхания поддержания и дыхания роста, полученных нами ранее. Значения соотношения NPP и GPP (CUE), полученные двумя методами, оказались очень близкими и равными 0,38 в сосняке и 0,39 в березняке. Приблизительно 50 % CO_2 , выделяемого при дыхании, было образовано за счет дыхания тонких корней, обладающих малой массой, но очень высокой интенсивностью дыхания. По данным о массе и приросту массы разных органов в возрастном ряду древостоев, взятых из литературы, рассчитана возрастная динамика соотношения нетто- и gross-продукции в высокопродуктивных сосняках и березняках. С увеличением возраста и нарастанием массы неассимилирующих органов в древостоях выделение CO_2 при дыхании увеличивается, а CUE уменьшается, причем в сосняках более резко, чем в березняках.

Ключевые слова. Нетто-продукция (NPP), gross-продукция (GPP), газообмен CO_2 древостоев, сосняки, березняки.

**A RELATIONSHIP BETWEEN NETTO- AND GROSS-PRODUCTION,
AND CO_2 GAS EXCHANGE IN SCOTS PINE AND BIRCH FOREST
STANDS OF HIGH PRODUCTIVITY**

Y. L. Tselniker, A. G. Molchanov

Institute of Forest Research of RAS, Uspenskoe, 143030 Moscow region, Russia.
Yudif@rambler.ru

Abstract. CO_2 uptake through photosynthesis and CO_2 release through respiration of different tree organs were measured in 40 years old Scots pine and

birch forest stands located in Yaroslavl province (57° 47' N , 38° 37' E). Photosynthesis and respiration of foliage at night and respiration of fine roots were measured directly, but the respiration of stem, branches and skeletal roots were calculated on the basis of coefficients of maintenance and growth respiration, which have been determined by the authors earlier. Production indices were calculated on the basis of rates of photosynthesis and absorption of solar radiation by forests canopy. Net production was quantified using two methods: the forestry one, i.e. the determination of annual mass increment of all tree organs, and the physiological one, i.e. measuring the difference between CO₂ uptake in photosynthesis and CO₂ release through respiration. A ratio NPP/GPP (CUE) determined by these two methods occurred very similar for pine stand (0.38) and for birch stand (0.39). About 50 % of CO₂ emission were formed due to fine root respiration, which had small mass and very high respiration intensity per unit mass. The NPP and GPP age trends for Scots pine and birch forest stands of high productivity was calculated on the basis of literature data about mass and mass increment of different organs in forest stands. The emission of CO₂ through respiration increases and CUE decreases with age.

Keywords. Net-production (NPP), Gross-production (GPP), CO₂ gas exchange, forest stands, Scots pine stands, birch stands.

Введение

При изучении роли леса в балансе CO₂ атмосферы обычно определяют два показателя: количество CO₂ (или эквивалентное количество углерода), поглощенного древостоем в процессе фотосинтеза (Gross Primary Production — GPP) и аккумулированного в древостое после расходования части вещества на дыхание (Net Primary Production — NPP). Соотношение NPP и GPP получило специальное обозначение CUE (Carbon Use Efficiency).

В первых работах по изучению газообмена CO₂ в древостоях дыхание не измерялось. Предполагалось просто, что дыхание всех органов (листьев, стволов ветвей и корней) составляет 60 % количества CO₂, поглощенного при фотосинтезе (Boysen-Jensen, 1932).

Сейчас имеется довольно много экспериментальных данных о соотношении нетто- и gross-продукции, которые были получены в древостоях, состоящих из разных пород, в разных частях света. Особенно много таких работ проведено в США и Канаде.

Существует точка зрения, что соотношение нетто- и gross-продукции у разных пород и даже в разном климате постоянно и составляет $0,47 \pm 0,04$ (Waring et al., 1998; Gifford, 2003) (это означает, что при дыхании выделяется 53 % ассимилированного CO₂, т. е. близко к той цифре, которую приводили первые исследователи). Если это так, как считают Варинг с соавторами, то это сильно облегчит исследования газообмена древостоев, поскольку избавит от необходимости измерять дыхание всех

органов дерева. Однако эта точка зрения не подтверждается расчетами Мякела и Валентин (Mäkelä and Valentine, 2001), согласно которым соотношение NPP/GPP в сосняках закономерно уменьшается от 0,6 до 0,18 при увеличении возраста и высоты деревьев.

Таким образом, вопрос о соотношении NPP и GPP все еще окончательно не решен и требует дополнительных исследований.

Методы и материалы

В наших исследованиях расчет gross-продукции производится на основании данных об интенсивности фотосинтеза, выраженной через коэффициент использования поглощенной радиации на фотосинтез, и поглощенной исследуемым древостоем солнечной радиации (Молчанов, 1983, 2000), тогда как нетто-продукция может быть определена двумя методами: лесоводственным (по годичному приросту массы всех органов) и физиологическим (на основании определения gross-продукции древостоя и дыхания всех органов дерева и массы этих органов на 1 га).

Лесоводственный метод исследования позволяет получить наиболее точные данные о величине нетто-продукции надземных органов за длительный промежуток времени (три года и более). Прирост массы подземных органов определяется значительно менее точно, особенно годичный прирост тонких сосущих корней. Кроме того, он не позволяет определить динамику продуктивности за относительно короткие (месяцы, сутки) промежутки времени и в результате не позволяет оценить влияния кратковременных изменений факторов окружающей среды на продуктивность древостоя, а также оценить роль отдельных органов в выделении CO₂ древостоем.

Таким образом, при физиологическом методе исследования нетто-продукция определяется как разность между величиной gross-продукции и суммарным расходом биомассы (или выделения эквивалентного количества CO₂) на дыхание всех органов:

$$NPP = GPP - (R_{dl} M_l + R_s M_s + R_b M_b + R_{sr} M_{sr} + R_{fr} M_{fr}), \quad (1)$$

где R — дыхание, R_d — ночное дыхание фотосинтезирующих органов, M — биомасса. Индексы: l — листья (хвоя), s — ствол, b — ветви, sr — скелетные корни, fr — тонкие корни.

Большое число необходимых для расчета показателей, каждый из которых в природных условиях сильно варьирует, вносит в расчеты существенную ошибку. Но наряду с такой случайной ошибкой в расчетах могут быть и систематические ошибки. Они связаны прежде всего со сложностью пересчета данных по интенсивности фотосинтеза и дыхания, полученных на отдельных органах, в количество CO₂ (или органической массы), аккумулированного или потраченного на дыхание на 1 га древостоя. Кроме того, имеются специфические сложности в определении интенсивнос-

ти дыхания отдельных органов, прежде всего дыхания тонких корней, которая сильно зависит от концентрации CO_2 в воздухе, окружающем корни, а также в определении круговорота биомассы сосущих корней.

Принимая во внимание, что каждый из методов (лесоводственный и физиологический) определения нетто-продукции древостоев имеет свои недостатки и эти недостатки у каждого из методов различны, представляет интерес сопоставление данных, полученных обоими методами. Эти данные могут дополнять друг друга, а их сопоставление может служить средством контроля правильности полученных обоими методами результатов. Так, значительные расхождения величин, полученных на основании прироста биомассы и на основании результатов измерений газообмена, могут свидетельствовать об ошибках при измерении всех статей углеродного баланса древостоя. С учетом всего сказанного выше, в задачу настоящей работы входило:

- 1) получение данных о соотношении нетто- и gross-продукции в высокопродуктивных сосняке и березняке в зоне южной тайги;
- 2) сопоставление данных по нетто-продукции, полученных лесоводственным и физиологическим методами;
- 3) выявление сезонной динамики величин NPP и GPP в сосняке и березняке;
- 4) расчет величин CUE в древостоях разного возраста.

Объекты и методы

Сомкнутые высокопродуктивные древостои сосны и березы, где проводились измерения фотосинтеза, биомассы и прироста биомассы, росли в 30 км от г. Углич Ярославской области ($57^\circ 47'$ с. ш., $38^\circ 37'$ в. д.) на дерново-подзолистой песчаной почве. Средняя высота древостоя в начале исследований (38 лет) в сосняке равнялась 17,2 м, средний диаметр — 14,4 см, число стволов на 1 га — 2288. В березняке соответствующие показатели составляли 21,5 м, 13 см и 1980.

Продуктивность обоих древостоев по таблицам хода роста соответствовала 1а бонитету. Определение биомассы надземных органов, годичной продукции, сухой массы отмерших частей и массы подстилки производилось ежегодно в течение 9 лет (Молчанов и др., 1982; Уткин и др., 1984) с использованием методических разработок А. А. Молчанова и В. В. Смирнова (1967) и Л. Е. Родина и др. (1968). Определение массы и прироста массы корней в течение 5 лет проводил В. В. Мамаев (1986). Массу корней диаметром более 2 мм определяли путем взятия модельных деревьев по ступеням толщины по методическим разработкам А. А. Молчанова и В. В. Смирнова (1967), а массу корней диаметром менее 2 мм — путем взятия монолитов почвы по методике А. Я. Орлова (1967). Изучение длительности жизни тонких сосущих корней не проводилось.

Измерения газообмена CO_2 хвои сосны проводились в трех слоях полога древостоя на неотделенных побегах или неотделенных листьях березы, заключенных в полиэтиленовую камеру, непрерывно в течение нескольких суток в токе воздуха. Концентрация CO_2 в воздухе до и после экспозиционной камеры регистрировалась инфракрасным газоанализатором ГИП-7 (Москва). Одновременно регистрировали: интенсивность суммарной радиации (380—3000 нм), падающей и отраженной на разных уровнях и вблизи камеры, с помощью термоэлектрического пиранометра Янишевского (Тбилиси), температуру воздуха вне и внутри камеры — медным термометром сопротивления. Количество CO_2 , поглощенное при фотосинтезе за сутки, определяли на основании приблизительно 300 измерений, сделанных в течение 15 светлых часов. На основании полученных данных фотосинтеза и коэффициента поглощения солнечной радиации охвоенным побегом или листом определили коэффициент использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез в трех слоях полога насаждений. По этому коэффициенту и поступлению солнечной радиации к исследуемому побегу получали зависимость коэффициента использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез охвоенных побегов или листьев в трех слоях полога насаждений от поступления к этим побегам или листьям солнечной радиации. Используя эту зависимость и ежесуточные данные о динамике распределения суммарной радиации в полог насаждений в течение сезона, вычисляли количество CO_2 , поглощенного за день для каждого из трех слоев полога, а далее — и для всего полога за месяц и вегетационный период. В темные часы суток определяли количество CO_2 , выделенного при дыхании хвои (листьев). Определение ночного дыхания хвои (листья) проводили на основании интенсивности ночного газообмена, продолжительности ночного периода и массы хвои (листья) в насаждении. Более подробное описание методики расчетов и результатов этих исследований сделано А. Г. Молчановым (Молчанов, 1983, Molchanov, 2000). Эта методика отличается от широко распространенной тем, что не требует определения массы или площади листовой, а основана на поглощенной пологом насаждения солнечной радиации, величина которой непосредственно зависит от архитектоники и массы листьев в исследуемом пологе насаждения. Кроме того, в этой методике учитывается взаимозатенение фотосинтезирующих органов, особенно для оценки газообмена в сосновом насаждении, когда интенсивность фотосинтеза определялась на охвоенных побегах, а величина поглощенной солнечной радиации исследуемых побегов определялась непосредственно в фотоинтегрирующей сфере (Молчанов, Хазанов, 1975).

Интенсивность дыхания стволов, ветвей и корней диаметром более 2 мм определяли путем расчета с использованием полученных ранее коэффициентов дыхания роста (α) и дыхания поддержания (m) (Цельникер, Малкина, 1993). Расчет коэффициентов производился на основании измерений интенсивности дыхания у деревьев разного диаметра, растущих в

Серебряноборском опытном лесничестве Института лесоведения вблизи Москвы. Измерения проводились 5 лет в течение всего вегетационного периода. Коэффициент m соответствовал количеству CO_2 (или эквивалентному количеству клетчатки), выделенного за сутки единицей массы органа в периоды, когда рост древесины отсутствует (апрель, октябрь). Этот расчет отличается от общепринятого, поскольку в большинстве публикаций коэффициент m рассчитывается по отношению к массе заболони, в которой доля живых (дышащих) клеток по отношению к массе древесины больше, чем во всей массе ствола. Поэтому значения коэффициента у нас получились ниже, чем обычно приводятся в литературе. Кроме того, расчет коэффициента по отношению ко всей (а не только живой) массе может увеличить разброс данных, так как соотношение живых и мертвых тканей в стволе и ветвях меняется в зависимости от возраста и диаметра дерева. Тем не менее мы предпочли рассчитывать коэффициент m по отношению ко всей массе. Такой расчет гораздо проще и удобнее, так как избавляет от необходимости определения массы заболони у каждого дерева.

Поскольку интенсивность дыхания поддержания зависит от температуры, для этих периодов рассчитывали температурные коэффициенты дыхания (Q_{10}).

По нашим данным, Q_{10} составил:

	Сосна	Береза
Стволы и ветви	2,27	2,09
Скелетные корни	2,81	2,60
Тонкие корни	3,00	3,00

На основании этих данных для расчета количества CO_2 , выделяющегося при дыхании поддержания за определенный промежуток времени, вносили поправку на температуру воздуха или почвы с использованием средних многолетних данных за указанный период, полученных ближайшей сетевой метеостанцией.

Дыхание роста вычисляли как разность между суммарным количеством выделенного CO_2 древесины (середина мая — начало сентября) и количеством CO_2 , выделенного при дыхании поддержания за этот период. Коэффициент a рассчитывали как отношение количества выделенного при дыхании роста CO_2 (клетчатки) к приросту сухой массы.

Оба коэффициента (a и m) у сосны и березы оказались близкими, и, по всей вероятности, они не очень сильно меняются в разных условиях произрастания. В связи с этим мы сочли возможным использовать коэффициенты, полученные в другом древостое (но в близких условиях), для расчетов применительно к нашим объектам. Коэффициент a оказался близким к тому, что опубликовано в литературе для других растений (Головкин, 1999).

Измерение интенсивности дыхания корней проводил В. В. Мамаев (1984, 1993) на тех же пробных площадях, где определялся фотосинтез. Расчеты показали, что для крупных корней коэффициенты дыхания поддержания и дыхания роста очень близки к соответствующим коэффициентам у стволов и ветвей.

Сложнее обстояло дело с определением дыхания тонких корней. При измерениях их дыхания В. В. Мамаев извлекал корневые мочки из почвы, очищал от почвы и помещал в камеру, где концентрация CO_2 соответствовала таковой в атмосфере, тогда как в почвенном воздухе концентрация CO_2 была в несколько раз выше. Как показали последующие специальные исследования (Qi, 1994; McDowell et al., 1999; Clinton and Vose, 1999) пониженная концентрация CO_2 в камере приводила к значительному (в два-три раза) повышению интенсивности дыхания. Это косвенно подтверждается при сравнении данных В. В. Мамаева с данными других авторов, измерявших дыхание тонких корней либо при более высокой концентрации CO_2 в камере, либо при сопоставлении его данных с результатами измерения эмиссии CO_2 из почвы в тех же древостоях (Молчанов, 1990). Так по нашим расчетам, интенсивность дыхания всех корней в июне составляла $1,65 \text{ т } \text{CO}_2 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{мес}^{-1}$ (см. табл. 2), а по данным, полученным измерением эмиссии CO_2 из почвы, — $2,2 \text{ т } \text{CO}_2 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{мес}^{-1}$ (Молчанов, 1990). Поэтому при расчете количества CO_2 , выделяемого при дыхании тонких корней, мы уменьшили данные В. В. Мамаева в два раза. Разделения дыхания на компоненты (дыхание роста и дыхание поддержания) для тонких корней, период роста которых точно установить трудно, мы не проводили.

В результате проделанной предварительной работы мы смогли рассчитать баланс CO_2 и вклад отдельных органов в газообмен. Для расчета в формулу (1) были внесены изменения:

$$\begin{aligned} \text{NPP} = \text{GPP} - (R_l M_l + m_s M_s + a_s \Delta M_s + m_b M_b + \\ + a_b \Delta M_b + m_{sr} M_{sr} + a_{sr} \Delta M_{sr} + R_{fr}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь R — дыхание, M — биомасса, ΔM — прирост биомассы, a — коэффициент дыхания роста, m — коэффициент дыхания поддержания; индексы: l — листья (хвоя), s — ствол, b — ветви, sr — скелетные корни, fr — тонкие корни.

Результаты

В табл. 1 мы приводим значения коэффициентов дыхания роста и дыхания поддержания. Расчет m велся для температуры 15°C . Результаты определения массы и прироста массы в сосняке и березняке, а также газообмена CO_2 при фотосинтезе приведены в табл. 2 и 3. Как видно из этих данных, прирост сухой массы всех органов за вегетационный период (т. е. нетто-продукция) составил в сосняке $7,8 \text{ т/га}$ (что соответствует аккумуля-

Таблица 1

**Коэффициенты дыхания поддержания (*m*) и дыхания роста (*a*) у стволов
и ветвей деревьев**

Порода	Период	<i>m</i> (в сутки на 1 кг массы ствола)		<i>a</i> (на 1 кг прироста массы за лето)	
		г C ₆ H ₂₂ O ₁₁	г CO ₂	г C ₆ H ₂₂ O ₁₁	г CO ₂
Сосна	Весна	0,30	0,44	0,22	0,32
	Осень	0,11 ± 0,01	0,16		
Береза	Весна	0,34 ± 0,16	0,50	0,24	0,35
	Осень	0,09 ± 0,02	0,13		

ции 14,3 т CO₂/га), а в березняке — 12,3 т/га (22,55 т CO₂/га). В то же время gross-продукция в сосняке равнялась 35,6 т/га CO₂, а в березняке — 59,1 т CO₂/га. Следовательно, значение CUE в сосняке составило 0,40, а в березняке — 0,38. Эти данные лежат в пределах тех значений, которые обычно приводятся в литературе для различных лесных древостоев (табл. 4).

Сопоставляя данные о нетто-продукции, полученные лесоводственным методом, с данными по балансу газообмена, легко убедиться в том, что в обоих древостоях цифры, полученные разными методами, оказались близкими: в сосняке баланс CO₂ равнялся 13,59 т CO₂/га, а в березняке — 22,86 т CO₂/га. Это служит еще одним доказательством того, что коррекция цифр по дыханию тонких корней была сделана нами правильно.

На основании данных табл. 2 и 3 мы рассчитали долю участия каждого органа в общем газообмене дерева (табл. 5). Оказалось, что наибольшую долю CO₂ выделяют тонкие корни, хотя их масса очень мала. При этом количество CO₂, выделяемого тонкими корнями, рассчитывается очень неточно из-за сложности и трудоемкости определения сезонной динамики круговорота тонких корней. На втором месте стоят стволы, но в этом случае причиной выделения большого количества CO₂ служит большая масса стволов.

Рассмотрение баланса газообмена за более короткие промежутки времени позволяет установить, что соотношение выделения и поглощения CO₂ существенно меняется по месяцам вегетационного периода: у вечнозеленой сосны это соотношение оказывается наиболее высоким в апреле—мае и сентябре, тогда как в середине лета, несмотря на высокий фотосинтез, дыхание настолько сильно увеличивается, что соотношение выделения и поглощения CO₂ снижается в несколько раз (рис. 1 а). Такие же изменения соотношения дыхания и поглощения CO₂ соснового древостоя в летний и осенний периоды были показаны нами ранее (в июле было 0,26, а октябре — 0,57, однако разница в соотношении дыхания всего насажде-

Таблица 2

Газообмен CO_2 в течение вегетационного периода ($\text{т}/(\text{га} \cdot \text{мес})$)
в 40-летнем сосняке кислично-черничном 1а бонитета,
по данным (Якшина, Аветисян, 1982; Молчанов, 1983; Мамаев, 1986;
Малкина, Цельникер, 1993)

Орган, показатель	М	Месяц								Итого
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
Поглощение CO ₂										
Хвоя										
текущего года	2,0	—	—	0,4	1,7	2,0	1,8	1,0	6,9	
2-го года и старше	5,7	3,8	6,8	5,7	5,2	3,6	2,4	1,2	28,7	
Всего	7,7	3,8	6,8	6,1	6,9	5,6	4,2	2,2	35,6	
Выделение CO ₂										
Ночное дыхание										
хвоя текущего года	2,0	—	—	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	1,1	
2-го года и старше	5,7	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	1,8	
Всего		0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,3	2,9	
Стволы										
R _m	124	0,4	1,3	1,6	2,0	1,1	0,4	0,1	6,9	
R _g	3,4			0,4	0,4	0,3			1,1	
Ветви										
R _m	11,6	0,05	0,1	0,15	0,2	0,1	0,04	0,01	0,65	
R _g	0,4	—		0,05	0,05	0,03	—	—	0,13	
Всего		0,45	1,4	2,2	2,65	1,53	0,44	0,11	8,78	
Корни скелетные										
R _m	26,2	0,1	0,2	0,35	0,45	0,2	0,1	0,03	1,43	
R _g	1,3			0,1	0,15	0,15			0,4	
Корневые мочки	4,7		0,4	1,2	2,35	3,0	1,4	0,15	8,5	
Всего		0,1	0,6	1,65	2,95	3,35	1,5	0,18	10,33	
Итого выделено		0,85	2,4	4,25	6,0	5,48	2,44	0,59	22,03	
Баланс		2,95	4,40	1,85	0,90	0,12	1,76	1,63	13,61	

Примечание. Здесь и далее М — масса ($\text{т}/\text{га}$) и прирост массы ($\text{т}/(\text{га} \cdot \text{год})$), R_m — дыхание поддержания, R_g — дыхание роста.

Таблица 3

Газообмен CO_2 в течение вегетационного периода (т/(га·мес))
в 40-летнем березняке кислично-черничном 1а бонитета,
по данным (Молчанов, 1983; Мамаев, 1986; Малкина, Цельникер, 1993)

Орган, показатель	M	Месяц								Итого
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
Поглощено CO ₂	3,5	—	6,5	14,8	15,9	13,3	7,9	0,7	59,1	
Выделение CO ₂										
Листья, ночное дыхание	3,5	—	1,8	0,5	0,6	0,7	0,7	0,2	4,5	
Стволы										
R _m	144	0,6	1,7	2,2	1,9	1,0	0,5	0,2	8,1	
R _g	5,7			0,7	0,7	0,6			2,0	
Ветви										
R _m	14,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,05	0,02	0,87	
R _g	1,1			0,2	0,1	0,1			0,4	
Корни скелетные										
R _m	34,7	0,1	0,3	0,4	0,6	0,3	0,1	0,02	1,82	
R _g				0,1	0,2	0,15			0,45	
Корневые мочки	3,5		0,7	2,5	5,2	6,1	3,2	0,4	18,1	
Всего выделено		0,8	4,7	6,8	9,5	9,05	4,55	0,84	36,24	
Баланс CO ₂		-0,7	1,8	8,0	6,4	4,25	3,35	-0,14	22,86	

ния (вместе с эмиссией CO_2 из почвы) летом и осенью была значительно меньше: 13 и 16 % (Молчанов, 1990; Molchanov, 2002). Причиной значительного усиления дыхания в середине лета служит повышение температуры и большие дыхательные затраты на рост.

Иная динамика выделения и поглощения CO_2 и их соотношения отмечается у листопадной березы: в апреле и октябре береза только выделяет CO_2 , в мае и октябре фотосинтез идет не в полную силу, и лишь в летние месяцы поглощение CO_2 при фотосинтезе резко усиливается и достигает максимально возможного значения (рис. 1 б). В то же время усиление дыхания в летние месяцы относительно не так велико, как у сосны. В результате с июня по сентябрь соотношение выделение/поглощение CO_2 в березняке меняется в более узких пределах, чем в сосняке.

Представляет большой интерес расчет значений NPP, GPP и CUE у древостоев разного возраста. Его можно сделать, если принять, что интен-

Соотношения NPP и GPP (CUE) у разных пород

Порода	Возраст, число лет	Место исследования, координаты	CUE	Список литературы
<i>Pinus banksiana</i>	63	Канада, 54—55° с. ш., 105° з. д.	0,39	Ryan et al., 1997
<i>Pinus radiata</i>	22	Австралия, 35° ю. ш., 149° в. д.	0,43—0,50	Ryan et al., 1996
<i>Pinus radiata</i>	100	Новая Зеландия, 43° ю. ш., 173° в. д.	0,52—0,57	Arneeth et al., 1998
<i>Pinus ponderosa</i>	7	США, 44° с. ш., 121° з. д.	0,44	Waring et al., 1998
<i>Pinus sylvestris</i>	0—30	Финляндия	0,6—0,18	Mäkelä and Valentine, 2001
<i>Picea mariana</i>	115—150	Канада, 54—55° с. ш., 105° з. д.	0,34	Ryan et al., 1997
<i>Picea sitchensis</i>	50	США, 45° с. ш., 124° з. д.	0,49	Waring et al., 1998
<i>Juniperus occidentalis</i>	10	США, 44° с. ш., 121° з. д.	0,40	Waring et al., 1998
<i>Tsuga heterophylla</i>	30	США, 43° с. ш., 123° з. д.	0,47	Waring et al., 1998
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	40	США, 45° с. ш., 124° з. д.	0,46	Waring et al., 1998
<i>Alnus rubra</i>	13	США, 45° с. ш., 124° з. д.	0,52	Waring et al., 1998
<i>Quercus rubra</i>	24	США, 42° с. ш., 72° з. д.	0,53	Waring et al., 1998
<i>Populus tremuloides</i>	53—63	Канада, 54—55° с. ш., 105° з. д.	0,44	Ryan et al., 1997
<i>Pinus sylvestris</i>	30	Россия, 62° с. ш., 34° в. д.	0,36	Яльнская, 1999
<i>Pinus sylvestris</i>	40	Россия, 57° с. ш., 38° в. д.	0,25—0,57	Молчанов, 1990, Molchanov, 2002

<i>Pinus sylvestris</i>	40	Россия, 57° с. ш., 38° в. д.	0,38	Настоящая статья
<i>Betula pendula</i>	40	Россия, 57° с. ш., 38° в. д.	0,39	
<i>Picea abies</i> F1	125	Россия, 56° с. ш., 32° в. д.	0,33	Цельникер и др.
<i>Picea abies</i> F2	125	Россия, 56° с. ш., 32° в. д.	0,37	(не опубликовано)
Средние данные для фитоценозов				
Травы и сеянцы в сосудах			0,58±0,03	Gifford, 2003
Деревья			0,47±0,05	Gifford, 2003
Леса				
тропические		2° с. ш.	0,51	Gifford, 2003
умеренной зоны		36° с. ш.		Gifford, 2003
бореальные		53° с. ш.	0,54	Gifford, 2003

Примечание. F1 — ельник чернично-кисличный II бонитета, F2 — ельник чернично-сфагновый III бонитета.

Таблица 5

Доля участия (%) разных органов 40-летних деревьев в газообмене

Газообмен	Сосняк		Березняк	
	т/га	%	т/га	%
Поглощение CO_2	35,6	100	59,1	100
Выделение при дыхании	22,03	60,0	36,24	61,2
листьев (хвой) ночью	2,9	8,1	4,5	7,6
стволов	8,0	22,5	10,1	17,1
ветвей	0,78	2,2	1,27	2,1
корней скелетных	1,85	5,2	2,27	3,8
корневых мочек	8,5	23,8	18,1	30,6

сивность процессов газообмена CO_2 и коэффициенты дыхания поддержания и дыхания роста мало меняются с возрастом и, следовательно, общее количество поглощенного и выделенного CO_2 в расчете на 1 га древостоя зависит только от массы различных органов. Тогда интересующие нас значения можно будет получить с использованием для расчета имеющихся в литературе данных о возрастной динамике массы и прироста массы разных древостоев. Результаты проведенного нами расчета приведены в табл. 6 и 7.

Согласно расчетам, в сосняках за период 20—200 лет CUE уменьшается. Это согласуется с результатами, приводимыми Mäkelä и Valentine (2001), но в отличие от данных этих авторов уменьшение CUE с возрастом оказывается не столь

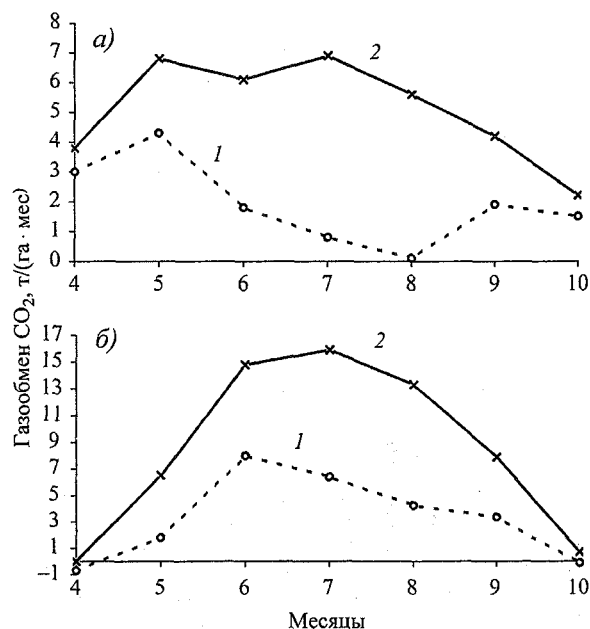


Рис. 1. Сезонная динамика баланса CO_2 (1) и поглощения CO_2 при фотосинтезе (2) в 40-летних высокопродуктивных древостоях. а — сосняк, б — березняк.

Таблица 6

Выделение CO_2 (т/га за апрель—октябрь) при дыхании деревьев в сосняках I и Ia бонитета

Орган	Возраст, число лет									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Хвоя	3,0	3,2	3,2	3,1	2,9	2,7	2,3	1,8	1,2	0,5
Стволы										
R_m	3,2	6,4	9,0	10,5	11,7	12,7	13,5	14,2	14,8	15,4
R_g	1,7	1,8	1,7	1,4	1,1	0,8	0,6	0,2	0,2	0
Ветви										
R_m	0,7	0,9	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5
R_g	0,8	0,8	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
Корни скелетные										
R_m	0,8	1,5	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,0	3,2	3,3
R_g	0,8	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
Корневые мочки	11,2	11,0	10,8	10,3	9,8	9,0	8,0	6,8	5,2	2,9
Сумма	23,2	26,7	29,4	30,0	30,3	30,2	29,8	28,5	27,2	24,6

Примечание. Данные о массе и приросте массы взяты из работ Н. Н. Слемнева (Слемнев, 1969), А. А. Молчанова (Молчанов, 1971), Н. И. Казиминова и др. (Казимиров и др., 1977), М. Г. Семечкиной (Семечкина, 1978) и др.; масса корневых мочек принята пропорциональной массе хвои.

значительным. Это обусловлено тем, что для древостоев сосны, так же как для древостоев березы, мы, основываясь на данных Эйдмана (Eidmann, 1961), приняли массу корневых мочек пропорциональной массе хвои и уменьшающейся у спелых и перестойных древостоев. Если бы этого не было и масса корней была бы после достижения некоторого возраста постоянной, то уменьшение CUE с возрастом древостоя было бы гораздо более значительным.

Имеющиеся в литературе данные для березы охватывают меньший промежуток времени (от 20 до 80 лет), и изменение CUE у березы с возрастом не столь значительное, как у сосны (оговорка в отношении возрастной динамики массы корневых мочек здесь также справедлива).

При более подробном анализе данных этих таблиц следует отметить, что у сосны увеличение выделения CO_2 при дыхании происходит в основном за счет увеличения дыхания стволов. При этом доля CO_2 , выделяемого стволами в суммарном дыхании, увеличивается с возрастом (от 20 до 200 лет) с 28 до 69 %, тогда как доля дыхания корневых мочек уменьшается с 48 до 12 %. В березняке доля дыхания стволов также увеличивается с возрастом с 25 до 36 %, а доля дыхания корневых мочек уменьшается с 59 до 44 %.

Таблица 7

**Выделение CO_2 (т/га за апрель—октябрь) при дыхании деревьев
в березняках чернично-кисличной группы**

Орган	Возраст, число лет						
	20	30	40	50	60	70	80
Листья	5,4	5,7	5,9	6,1	6,1	5,3	3,9
Стволы							
R_m	6,4	8,1	9,4	10,2	10,0	11,8	12,3
R_g	1,0	1,0	0,8	0,5	0,5	0,5	0,3
Ветви							
R_m	0,6	0,6	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1
R_g	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,04	0,02
Корни скелетные							
R_m	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0
R_g	0,2	0,2	0,1	0,07	0,06	0,04	0,02
Корневые мочки	21,7	22,7	23,8	24,3	24,3	21,2	15,5
Сумма	36,7	39,9	42,6	44,0	43,9	39,9	35,1

Примечание. Масса разных органов — по данным А. Ф. Ильющенко (Ильющенко, 1982), масса корневых мочек в разном возрасте принята пропорциональной массе листьев.

Заключение

Проведенная нами работа показала, что в высокопродуктивных древостоях сосны и березы в период кульминации прироста NPP составляет приблизительно 40 % GPP, причем лесоводственный и физиологический методы определения величины NPP дают очень близкие результаты. В течение вегетационного периода соотношение выделения при дыхании всех органов и поглощения CO_2 при фотосинтезе сильно меняются. Сезонная динамика этого показателя у вечнозеленой сосны и листопадной березы различны. У растений в молодом возрасте значительный вклад в количество выделенного при дыхании CO_2 вносят тонкие корни (корневые мочки), масса которых мала, но интенсивность дыхания очень высока. С увеличением возраста древостоя значительно увеличивается доля CO_2 , выделяемого при дыхании стволов, тогда как доля CO_2 , выделяемого при дыхании тонких корней, уменьшается. Соотношение NPP/GPP (CUE) с возрастом уменьшается.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФИ (02-04-48154).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Головкин Т. К. 1999. Дыхание растений. Физиологические аспекты. — СПб.: Наука. — 204 с.
- Ильющенко А. Ф. 1982. Первичная продуктивность березняков Рыбинского района Ярославской области. — В кн.: Биологическая продуктивность лесов Поволжья. — М.: Наука, с. 73—98.
- Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванченков А. А., Морозова Р. М. 1977. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. — Л.: Наука. — 301 с.
- Мамаев В. В. 1986. Экологическая характеристика корневых систем в высокопродуктивных насаждениях сосны и березы в подзоне южной тайги. — Автореферат дисс. канд. биол. наук. — Днепропетровск. — 17 с.
- Мамаев В. В. 1993. Дыхание корневых систем. — В кн.: Рост и газообмен CO_2 у лесных деревьев. — М.: Наука, с. 162—180.
- Молчанов А. А. 1971. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. — М.: Наука. — 276 с.
- Молчанов А. А., Смирнов В. В. 1967. Методика изучения прироста древесных растений. — М.: Наука. — 100 с.
- Молчанов А. Г. 1983. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев. — М.: Наука. — 134 с.
- Молчанов А. Г. 1990. Баланс углекислоты в сосновом насаждении южной тайги. — Лесоведение, № 1, с. 47—52.
- Молчанов А. Г., Мамаев В. В., Осипов В. В., Соколов А. А. 1982. Сравнительная характеристика биопроductивности 40-летних сосново-березовых насаждений Угличского района Ярославской области. — В кн.: Биологическая продуктивность лесов Поволжья. — М.: Наука, с. 147—163.
- Молчанов А. Г., Хазанов. 1975. Измерение и расчет поглощения ФАР побегами сосны. — Лесоведение, № 2, с. 75—79.
- Орлов А. Я. 1967. Метод определения массы корней в лесу и возможность учета годичного прироста органической массы в толще лесной почвы. — Лесоведение, № 1, с. 84—70.
- Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И. 1968. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. — Л.: Наука. — 143 с.
- Семечкина М. Г. 1978. Структура фитомассы сосняков. — Новосибирск: Наука. — 164 с.
- Слемнев Н. Н. 1969. Прирост фитомассы и фотосинтез хвои в сосновых древостоях различных полнот и типов леса. — Автореферат дисс. канд. биол. наук. — Л. — 18 с.
- Уткин А. И., Каплина Н. Ф., Молчанов А. Г. 1984. Биологическая продуктивность 40-летних высокопродуктивных древостоев сосны и березы. — Лесоведение, № 3, с. 28—36.
- Цельникер Ю. Л., Малкина И. С. 1993. Дыхание стволов и ветвей. — В кн.: Рост и газообмен CO_2 у лесных деревьев. — М.: Наука, с. 129—163.
- Якшина А. М., Аветисян Е. А. 1982. О газообмене ствола сосны обыкновенной в Подмоскowie. — Лесоведение, № 6, с. 47—54.
- Ялынская Е. Е. 1999. Экофизиология дыхания сосны и CO_2 -газообмен в сосновых ценозах. — Автореферат дисс. канд. биол. наук. — Сыктывкар. — 28 с.
- Arnth A., Kellner F. M., Mc Severeny T. M., Byers J. N. 1998. Net ecosystem productivity and ecosystem carbon sequestration in a *Pinus radiata* plantation subject to soil water deficit. — Tree physiology, v. 18, p. 785—793.
- Boysen-Jensen P. 1932. Die Stoffproduction der Pflanzen. — Jena. — 108 s.

Clinton B. D., Vose J. M. 1999. Fine root respiration in mature eastern white pine (*Pinus strobus*) in situ: the importance of CO₂ in controlled environments. — *Tree physiology*, v. 19, p. 475—479.

Eidman F. E. 1962. Atmung der unterirdischen Organe und Abgaben an die Mikoriza. — In: Intern. Symp. Baumphysiologie. Innsbruck. S.43—45.

Gifford R. M. 2003. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon cycle research. — *Functional plant biology*, v. 30, p. 171—186.

Mäkelä A., Valentine H. T. 2001. The ratio of NPP to GPP: evidence of change over the course of stand development. — *Tree physiology*, v.21, p. 1015—1030.

McDowell N. G., Marshall J. D., Qi J., Mattson K. 1999. Direct inhibition of maintenance respiration in western hemlock roots exposed to ambient soil carbon dioxide concentrations. — *Tree physiology*, v. 19, p. 599—605.

Molchanov A. G. 2000. Photosynthetic utilization efficiency photosynthetically active radiation by Scots pine and birch forest stands in the southern taiga. — *Tree physiology*, v. 20, p. 1137—1148.

Molchanov A. G. 2002. Estimation of photosynthetic productivity of a forest stand using the efficiency in the utilisation of absorbed radiation by a stand for photosynthesis. — In: Monitoring of Energy-Mass Exchange between Atmosphere and Forests Ecosystems. Gottingen, p. 31—42.

Qi J., Marshall J. D., Mattson K. G. 1994. High soil carbon dioxide concentration inhibit root respiration of Douglas fir. — *New phytologist*, v. 128, p. 435—442.

Ryan M. G., Hubbard R. M., Pongracic S., Raison R. J., Mc Murtrie R. E. 1996. Foliage, fine root, woody tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nutrient stress. — *Tree physiology*, v. 16, p. 333—342.

Ryan M. G., Lavigne M. B., Gower S. T. 1997. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. — *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 28.871—28.883.

Waring R. H., Landsberg J. J., Williams M. 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production. — *Tree physiology*, v. 18, p. 129—134.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УКРАИНЕ

А. Н. Полевой¹, Н. И. Кульбида², И. В. Трофимова³, Т. И. Адаменко⁴

¹ Украина, 65016, Одесса, Львовская ул., д. 15, Одесский государственный экологический университет, apolevoy@tc.net.ua

² Украина, 01601, Киев, Золотоворотская ул., д. 6, Украинский гидрометеорологический центр, kulbida@ukrweather.kiev.ua

³ Украина, 03186, Киев, Чоколовский бульвар, д. 13, Украинский институт исследований окружающей среды и ресурсов

⁴ Украина, 01601, Киев, Золотоворотская ул., д. 6, Украинский гидрометеорологический центр, adamenko@ukrweather.kiev.ua

Реферат. Рассматриваются изменения агроклиматических условий возделывания озимой пшеницы в период осенней вегетации, оценка условий перезимовки растений, а также оценка весенне-летней вегетации при условии реализации различных сценариев изменения климата. С помощью модели формирования урожая озимой пшеницы дается оценка влияния изменений агроклиматических условий (по периодам вегетации) на показатели фотосинтетической продуктивности посевов озимой пшеницы. Приводится оценка возможных колебаний урожайности и валовых сборов зерна озимой пшеницы. Сделан вывод о возможном увеличении урожайности озимой пшеницы в большинстве регионов Украины при всех сценариях изменения климата с максимальным значением в степной зоне.

Ключевые слова. Озимая пшеница, изменения климата, модель, площадь листьев, фотосинтетическая продуктивность, урожайность, валовой сбор.

MODELLING THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON PRODUCTIVITY OF THE WINTER WHEAT IN UKRAINE

A. N. Polevoy¹, N. I. Kulbida², I. V. Trofimova³, T. I. Adamenko⁴

¹ Odessa State environmental University, 15, Lvovskaj str., 65016 Odessa, Ukraine, apolevoy@tc.net.ua

² Ukrainian Hydrometeorological Center, 6, Zolotovorotskaj str., 01601 Kiev, Ukraine, kulbida@ukrweather.kiev.ua

³ Ukrainian Institute of Researches of an Environment and Resources, 13, Chokolovskiy boul., 03186 Kiev, Ukraine

⁴ Ukrainian Hydrometeorological Center, 6, Zolotovorotskaj str., 01601 Kiev, Ukraine, adamenko@ukrweather.kiev.ua

Abstract. Changes in agroclimatic conditions for the cultivation of the winter wheat during autumn growth period, the evaluation of winter period conditions, as well as the evaluation of spring-and-summer conditions in relation to

plant growth under various scenarios of climate change are considered. The estimation of the influence of changes in agroclimatic conditions within different growth periods on parameters of photosynthetic efficiency of winter wheat crops is obtained using a simulation model for winter wheat yield. The estimation of possible variations in productivity and total grain yield in the winter wheat is carried out. The conclusion about possible increase in productivity of the winter wheat within the most parts of Ukraine under all scenarios of changes in climate has been made. The increase will be maximal in the steppe zone.

Keywords. Winter wheat, climate change, model, leaves area, photosynthetic productivity, yield, total yield.

Введение

Моделирование влияния изменения климата на продуктивность сельскохозяйственных культур, с одной стороны, опирается на построение математических моделей продукционного процесса, учитывающих влияние изменяющихся факторов внешней среды на формирование продуктивности агроэкосистем, а с другой — на полученные различными способами климатические сценарии, которые проецируются на период вегетации культурных растений.

Результаты исследований продукционного процесса растений позволяют судить о влиянии повышенных концентраций CO_2 в атмосфере на фотосинтетический аппарат, химический состав биомассы, параметры роста, распределение ассимилятов, морфогенез, скорость развития растений, показатели устойчивости к стрессовым условиям (Фотосинтез, продукционный процесс и продуктивность растений, 1989; Kimball, 1981). Наиболее однозначной реакцией растений на длительное произрастание при повышенном содержании CO_2 в атмосфере являются увеличение площади их листовой поверхности, уменьшение отношения площади листьев к сухой массе растения, увеличение чистой продуктивности фотосинтеза и относительной скорости роста сухой массы, особенно в период вегетативного роста (Imai, Murata, 1976). Отмечается также влияние повышенных концентраций CO_2 на эффективность использования воды растениями и устойчивость к водному стрессу (Sionit et al., 1980).

Построение климатических сценариев ведется путем рассмотрения палеоклиматических аналогов, использования расчетов по глобальным климатическим моделям, подбора пространственно-временных аналогов, стохастического моделирования климатических ресурсов.

Изучение и оценка возможных последствий влияния изменения климата на продуктивность агроэкосистем при различных его сценариях уже охватили значительный ареал распространения мировых продовольственных культур (Climate change, 2001; Climate change and its impacts in Mongolia, 2000; Weather/climate and sustainable agricultural production and

protection, CAgM Report, 1997). Различия и противоречивость получаемых при этом оценок объясняются не только различием используемого аппарата исследований и климатических сценариев, но и весьма сложной и неоднозначной реакцией растений видов C_3 и C_4 на увеличение концентрации CO_2 в атмосфере.

Особенный интерес представляют результаты исследований, относящиеся к странам СНГ (Бобылев, 2003; Жуков, Святкина, 2000; Израэль, Сиротенко, 2003; Кобак, Кондрашева, 1992; Логинов, 1992; Сиротенко, 1991, 2000; Сиротенко, Абашина, 1998). Для почвенно-климатических условий Украины подобные исследования (Проблеми і стратегія виконання Україною рамкової конвенції ООН про зміну клімату, 2001; Україна та глобальний парниковий ефект, 1998) требуют углубления и развития.

Целью настоящего исследования являлась оценка влияния потенциального изменения климата на агроклиматические условия возделывания озимой пшеницы в Украине и, в свою очередь, их влияния на фотосинтетическую продуктивность культуры и урожай зерна. Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- оценка изменения агроклиматических условий осенней вегетации, перезимовки и весенне-летней вегетации озимой пшеницы при различных сценариях изменения климата;
- оценка фотосинтетической продуктивности озимой пшеницы при реализации различных сценариев изменения климата;
- оценка колебаний урожайности зерна озимой пшеницы в Украине в связи с изменением климата.

Методы и материалы

Для решения задачи моделирования влияния изменения климата на продуктивность озимой пшеницы в Украине применялись климатические сценарии, которые проецировались на период вегетации культуры, а также модель формирования урожая озимой пшеницы, позволяющая количественно оценить реакцию растений на изменение агроклиматических условий возделывания.

Климатические сценарии

В качестве сценариев изменения климатических параметров нами были использованы опубликованные в работе (Україна та глобальний парниковий ефект, 1998) результаты построения сценариев изменения климата в Украине:

- расчетов изменений климатических показателей по стационарным моделям общей циркуляции атмосферы, которые исследуют реакцию климатической системы на удвоение содержания CO_2 : *GFDL* (модель Лаборатории геофизической гидродинамики США); *UKMO* (модель Метеорологического бюро Соединенного Королевства);

Таблица 1

Расчетные изменения температуры воздуха ΔT и осадков P в среднем по Украине, полученные на основе моделей общей циркуляции атмосферы, по (Украина та глобальний парниковий ефект, 1998)

Показатель	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее за год
Сценарий GFDL 30 % (период 2030—2040 гг.)													
ΔT , °C	3,79	2,16	3,71	1,99	1,12	1,87	0,63	2,25	2,42	2,56	1,68	2,53	2,22
P , отн. ед.	0,95	1,15	1,25	0,89	1,20	1,27	1,48	0,96	0,80	0,95	1,20	0,93	1,07
Сценарий GFDL													
ΔT , °C	1,99	4,66	5,00	5,59	3,92	4,20	4,81	4,89	3,12	3,54	5,82	5,24	4,40
P , отн. ед.	1,09	1,38	1,20	1,01	1,05	1,08	1,24	1,12	1,55	1,10	1,21	1,04	1,14
Сценарий UKMO													
ΔT , °C	5,85	8,07	7,93	8,00	4,02	3,67	3,85	3,99	4,03	5,11	5,85	5,83	5,52
P , отн. ед.	1,05	1,33	1,01	1,04	1,10	1,00	1,15	1,29	1,02	0,88	1,36	1,15	1,09

— сценариев изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков в Украине на основе результатов расчетов по нестационарной модели, в которой моделируется отклик на постепенное (как более реалистичное) увеличение содержания парниковых газов на 30 %, разработанной Лабораторией геофизической гидродинамики США (*GFDL 30 %*).

При построении сценариев изменения климата в Украине (Україна та глобальний парниковий ефект, 1998) была проведена интерполяция данных модельных расчетов в местоположения метеорологических станций и комбинирование этих данных с данными реальных метеорологических наблюдений. В результате этого получены характеристики изменения температуры воздуха и сумм осадков по календарным месяцам в разрезе природно-климатических зон Украины: Полесья, лесостепи и степи. В среднем для территории Украины эти данные приводятся нами в табл. 1. В соответствии с этими сценариями при условиях удвоения содержания CO_2 в атмосфере температура воздуха в Украине повысится во все сезоны года. Наиболее существенно температура воздуха возрастет весной. Количество атмосферных осадков в среднем по Украине также будет увеличиваться. В отдельные сезоны это увеличение может превышать 20 %.

При оценке изменения агроклиматических условий осенней вегетации, перезимовки и весенне-летней вегетации озимой пшеницы при различных сценариях изменения климата нами рассматривалось изменение характеристик температуры воздуха и сумм осадков по сравнению с базовой климатической нормой за период 1961—1990 гг.

Модель формирования урожая озимой пшеницы

Для оценки реакции культуры озимой пшеницы на изменение агроклиматических условий возделывания в связи с изменением климата нами применялась модель формирования урожая озимой пшеницы (Полевой, 1988, 2003; Полевой, Кульбида, 2001). В основе этой модели лежит система уравнений радиационного, теплового и водного балансов и баланса биомассы (углеводов и азота) в растительном покрове.

Нами моделируются: радиационный, тепловой и водный режимы системы „почва — растение — атмосфера”, режим минерального питания растений и воздействие этих режимов на процессы фотосинтеза и дыхания растений, поглощения влаги и элементов минерального питания корневой системой растений, роста и развития растений, фотосинтетическую продуктивность посевов озимой пшеницы.

Основой биологической части модели является моделирование *прироста биомассы растений*. Он рассматривается как баланс углеводов (продуктов фотосинтеза и распада стареющих тканей, затрат на дыхание) и белков (поглощения азота из почвы, продуктов распада тканей, затрат на обновление жизнедеятельных структур тканей) на каждом временном шаге:

$$\frac{dm}{dt} = \Phi + C_{hydr} - R + N_{abs} + N_{hydr} - N_{sen}, \quad (1)$$

где $\frac{dm}{dt}$ — прирост биомассы растений; Φ — суммарный фотосинтез растений; C_{hydr} — масса углеводов, образующихся при распаде стареющих тканей; R — затраты углеводов на дыхание; N_{abs} — количество поглощенного из почвы азота; N_{hydr} — количество азота, образующегося при распаде белков; N_{sen} — затраты на обновление белков.

Процесс фотосинтеза листьев опишем формулой (Менжулин, 1968; Росс, Бихеле, 1968), в которой помимо таких факторов внешней среды, как фотосинтетически активная радиация и концентрация CO_2 в атмосфере, учитывается также влияние на фотосинтез уровня минерального питания, фазы развития растений, температурного режима и влагообеспеченности растений (Полевой, 1988):

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{1/\Phi_{pot} K_{\Phi}(N_{str}^L) + 1/a_C C_0 + 1/a_{\Phi} \Pi} \min \left\{ \alpha_{\Phi}, \Psi_{\Phi}, \frac{ET}{ET_{pot}} \right\}, \quad (2)$$

где Φ_{pot} — интенсивность потенциального фотосинтеза; a_C — наклон углекислотной кривой фотосинтеза; C_0 — концентрация CO_2 в атмосфере; a_{Φ} — наклон световой кривой фотосинтеза; Π — поглощенная растительным покровом фотосинтетически активная радиация; α_{Φ} — онтогенетическая кривая фотосинтеза; Ψ_{Φ} — температурная кривая фотосинтеза; $K_{\Phi}(N_{str}^L)$ — коэффициент обеспеченности растений элементами минерального питания; ET — суммарное испарение, ET_{pot} — испаряемость.

При стрессовых условиях и старении растений происходят процессы распада тканей. Опишем эти процессы уравнениями кинетики ферментативного катализа. При достаточно высокой концентрации гидролизуемого субстрата скорость распада может быть описана уравнением реакции нулевого порядка, а при достаточно низком — уравнением реакции первого порядка

$$\frac{dC_{hydr}}{dt} = K_{hydr}^0 K_{hydr}(T_a) K_{hydr}(W) \text{ при } C \geq C_{crit} \quad (3)$$

и

$$\frac{dC_{hydr}}{dt} = K_{hydr}^1 K_{hydr}(T_a) C K_{hydr}(W) \text{ при } C < C_{crit}, \quad (4)$$

где K_{hydr}^0 — константа скорости реакции нулевого порядка; K_{hydr}^1 — константа скорости реакции первого порядка; $K_{hydr}(T_a)$, $K_{hydr}(W)$ — функ-

ции влияния температуры воздуха T_a и влажности почвы W на скорость распада стареющих тканей; C_{crit} — критическое количество углеводов, определяющее начало реакции распада как реакции первого порядка; C — количество углеводов стареющих тканей.

Затраты на дыхание роста и дыхание поддержания моделируются с использованием концепции (McCree, 1970) с учетом изменения интенсивности дыхания в онтогенезе (Полевой, 1983) и под влиянием температуры воздуха (Curtu, 1971):

$$\frac{dR}{dt} = \alpha_R \left[C_G \frac{dm}{dt} + C_m m \varphi_R \right], \quad (5)$$

где α_R — онтогенетическая кривая дыхания; C_G — коэффициент затрат на дыхание роста; C_m — коэффициент затрат на дыхание поддержания; m — масса растений; φ_R — температурная кривая дыхания.

Процесс поглощения азота растением из почвы идет активным путем и пассивным — выносом азота с транспирационным током

$$\frac{dN_{abs}}{dt} = \frac{N_{abs}^{max} \bar{N}_{s,r} m_r}{K_{abs}^N + \bar{N}_{s,r}} K^N(T_s) + T_r \bar{N}_{s,w}, \quad (6)$$

где N_{abs}^{max} — максимальная скорость поглощения азота корневой системой растений; $\bar{N}_{s,r}$, $\bar{N}_{s,w}$ — концентрация азота соответственно у поверхности корней и в почвенном растворе; m_r — масса корней; K_{abs}^N — константа Михаэлиса—Ментен; $K^N(T_s)$ — функция влияния температуры почвы на скорость поглощения азота корневой системой; T_r — транспирация растений.

Распад белков в органах растения описывается уравнениями, аналогичными уравнениям (3) и (4).

Принимается, что скорость обновления белков каждого i -го органа растений пропорциональна содержанию азота в тканях этого органа:

$$\frac{dN_{isen}}{dt} = \alpha_{sen} N_i, \quad (7)$$

$$i \in l, s, r, p,$$

где α_{sen} — относительная скорость обновления белков; N_i — содержание азота в тканях i -го органа; l — листья; s — стебли; r — корни; p — колосья.

При моделировании роста растений рассматривается, что растение состоит из двух функционально связанных частей: надземной и подземной. Надземная часть в свою очередь разделяется на отдельные органы. Распределение углеводов и азота между отдельными органами надземной части

растения (листьями, стеблями, колосьями) проводится с использованием концепции распределения их по потребности в период роста делением и в период роста растяжением органов растений (Полевой, 1988).

Представленная выше система уравнений (1)—(7) описывает влияние факторов внешней среды на основные процессы жизнедеятельности растений и формирование их фотосинтетической продуктивности.

Результаты

При выполнении исследований в качестве базовых агроклиматических величин рассматривались средние многолетние характеристики за период 1961—1990 гг. По отношению к этим величинам рассматривалось изменение агроклиматических условий осенней вегетации, перезимовки и весенне-летней вегетации озимой пшеницы при различных сценариях изменения климата. В соответствии с климатическими сценариями определялось изменение темпов развития растений и сроков наступления фаз развития растений, агроклиматических условий произрастания растений, а также с помощью модели формирования урожая рассчитывались запасы продуктивной влаги в почве под культурой и влагообеспеченность посевов.

Под влиянием агроклиматических условий возделывания формируется вполне определенная динамика показателей фотосинтетической продуктивности посевов озимой пшеницы, которые обуславливают уровень ее продуктивности. Такими показателями являются: фотосинтезирующая площадь и фотосинтетический потенциал посевов, приросты растительной биомассы на единицу площади, чистая продуктивность фотосинтеза (эффективность процесса фотосинтеза на единицу площади листовой поверхности в единицу времени), урожай общей биомассы посевов, коэффициент хозяйственной эффективности, который показывает долю урожая хозяйственно-ценной части урожая в урожае общей биомассы посевов.

Показатели фотосинтетической продуктивности озимой пшеницы и урожай зерна рассчитаны с помощью модели формирования урожая культуры на фоне:

- средних многолетних агроклиматических характеристик, взятых за период 1961—1990 гг.;
- измененных агроклиматических условий в соответствии с принятыми сценариями изменения климата.

Рассмотрим изменение показателей агроклиматических условий возделывания озимой пшеницы, определяемых ими характеристик фотосинтетической продуктивности этой культуры и уровней урожайности в среднеобластном разрезе по природно-климатическим зонам Украины при реализации климатических сценариев *GFDL*, *GFDL 30 %* и *UKMO*.

*Агроклиматические условия и продуктивность
озимой пшеницы при условии реализации
климатических сценариев*

Климатический сценарий GFDL. Осенняя вегетация озимой пшеницы (посев — прекращение вегетации) будет проходить в значительно более поздние сроки (табл. 2) по сравнению со средними многолетними, в условиях пониженного на 0,2—1,4 °C температурного режима (табл. 3). Зима станет значительно теплее. Температура воздуха самой холодной зимней декады будет на 2—5 °C выше, чем обычно. Сумма отрицательных температур, характеризующая условия перезимовки, уменьшится во всех природно-климатических зонах в 3—4 раза (на 280—320 °C). Продолжительность периода перезимовки сократится на 1,5—2 месяца.

Количество осадков за период осенней вегетации возрастет во всех природно-климатических зонах: в Полесье, лесостепи и северной степи на 23—38 %, в южной степи, Прикарпатье и Закарпатье на 9—18 %. Возрастет также количество осадков и за зимний период. Количество осадков на один день периода перезимовки озимой пшеницы составит по природно-климатическим зонам от 1,6 до 1,9 мм/сут, а для южной степи — до 3,0 мм/сут.

Предполагается более раннее (на одну-две декады) начало возобновления вегетации озимой пшеницы (см. табл. 2). Период от возобновления вегетации до колошения будет проходить при несколько более низких температурах (на 0,5—1,0 °C) во всех природно-климатических зонах, кроме северной степи, где она повысится на 0,4 °C (табл. 4). Прохождение второго периода весенне-летней вегетации (колошение — восковая спелость) будет происходить на фоне повышенных температур воздуха (на 0,8—2,3 °C) и только в южной степи температура воздуха сохранится практически на прежнем уровне. Произойдет значительное смещение в сторону более ранних сроков времени наступления у растений фазы восковой спелости (на 17—30 дней).

Сумма осадков за период весенне-летней вегетации уменьшится в Полесье, лесостепи и Прикарпатье до 66—83 % климатической нормы, в степной зоне она останется практически на прежнем уровне. Это обусловит и соответствующую динамику запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы.

Изменение агроклиматических условий возделывания озимой пшеницы приведет в полесье к более раннему формированию ассимилирующего аппарата и сокращению времени его функционирования в сравнении со средней многолетней динамикой площади листьев озимой пшеницы (рис. 1). Повышение чистой продуктивности фотосинтеза от 5,4 до 8,5 г/(м²·сут) приведет к увеличению в 1,2 раза наибольших за вегетацию приростов общей биомассы до 220,3 г/(м²·дек), которое наступит на 2—3 декады раньше обычного (рис. 2).

Таблица 2

**Фазы развития озимой пшеницы (средние многолетние данные
и по различным сценариям изменения климата)**

Природно-климатическая зона	Даты наступления фаз развития				Продолжительность весенне-летнего периода
	посев	прекращение вегетации	возобновление вегетации	восковая спелость	
Средние многолетние					
Полесье	6,09	7,11	31,03	13,07	105
Лесостепь	9,09	8,11	29,03	7,07	101
Северная степь	11,09	12,11	27,03	2,07	98
Южная степь	19,09	25,11	21,03	26,06	98
Прикарпатье	9,09	11,11	29,03	20,07	114
Сценарий <i>GFDL</i>					
Полесье	12,10	12,12	12,03	12,06	93
Лесостепь	8,10	10,12	12,03	20,06	101
Северная степь	14,10	14,12	8,03	5,06	90
Южная степь	23,10	28,12	1,03	31,05	92
Прикарпатье	15,10	14,12	8,03	16,06	101
Сценарий <i>GFDL 30 %</i>					
Полесье	28,09	30,11	1,03	9,06	101
Лесостепь	29,09	30,11	28,02	6,06	99
Северная степь	13,10	13,12	25,02	1,06	97
Южная степь	1,11	5,01	20,02	23,05	93
Прикарпатье	23,10	22,12	23,02	13,06	111
Сценарий <i>UKMO</i>					
Полесье	19,10	19,12	16,02	27,05	101
Лесостепь	14,10	12,12	17,02	29,05	102
Северная степь	11,10	11,12	4,03	3,06	92
Южная степь	20,10	25,12	22,02	30,05	98
Прикарпатье	14,10	23,12	25,01	25,05	120

Таблица 3

**Агроклиматические условия возделывания озимой пшеницы
в осенне-зимний период**

Природно-климатическая зона	Период				
	Посев – прекращение вегетации		Перезимовка		
	Средняя температура воздуха, °С	Количество осадков, мм	Сумма отрицательных температур, °С	Средняя температура самой холодной декады, °С	Количество осадков, мм
Средние многолетние					
Полесье	8,8	87	445	–6,8	211
Лесостепь	9,2	71	440	–6,5	198
Северная степь	9,2	66	415	–6,4	200
Южная степь	8,6	65	195	–4,0	182
Прикарпатье	9,0	92	335	–5,9	190
Сценарий <i>GFDL</i>					
Полесье	8,5	108	116	–4,6	144
Лесостепь	9,0	98	119	–4,8	164
Северная степь	7,8	81	99	4,4	160
Южная степь	8,3	77	32	–9,1	189
Прикарпатье	8,0	100	79	–3,7	132
Сценарий <i>GFDL</i> 30 %					
Полесье	10,8	97	–	+0,4	122
Лесостепь	11,7	82	–	+0,4	151
Северная степь	8,4	84	–	+1,5	123
Южная степь	7,1	93	–	+3,5	53
Прикарпатье	9,7	83	–	+1,8	95
Сценарий <i>UKMO</i>					
Полесье	7,2	116	–	+0,7	123
Лесостепь	8,3	91	5,0	–0,5	128
Северная степь	8,8	84	31	–1,9	143
Южная степь	8,7	86	–	+0,4	96
Прикарпатье	7,4	102	–	+1,6	70

Таблица 4

Агроклиматические условия возделывания озимой пшеницы в весенне-летний период

Природно-климатическая зона	Количество осадков, мм	Средняя температура воздуха за период, °С		Средние запасы влаги в метровом слое почвы за период, мм		Сумма ФАР за вегетационный период, ккал/см ²	Суммарное испарение за вегетационный период, мм	Дефицит влаги за вегетационный период, мм
		Возобновление вегетации—колошение	Колошение—восковая спелость	Возобновление вегетации—колошение	Колошение—восковая спелость			
Средние многолетние данные								
Полесье	260	13,2	17,1	207	166	21,8	312	64
Лесостепь	189	12,9	18,1	146	123	21,2	252	52
Северная степь	147	13,3	18,7	111	90	20,5	220	101
Южная степь	114	13,3	19,4	87	51	21,6	192	175
Прикарпатье	444	12,3	17,1	251	236	24,1	428	212
Сценарий GFDL								
Полесье	194	12,7	19,4	215	156	18,4	251	81
Лесостепь	157	13,3	19,5	162	100	19,4	245	19
Северная степь	144	12,5	20,3	149	75	18,2	226	42
Южная степь	107	12,4	19,2	128	68	17,5	193	73
Прикарпатье	291	11,3	17,9	234	196	20,6	313	135

Сценарий GFDL 30 %

Полесье	196	11,1	17,4	238	166	18,8	268	90
Лесостепь	172	11,2	18,3	165	96	20,0	236	34
Северная степь	151	13,0	18,5	132	77	18,3	217	35
Южная степь	111	11,5	17,1	122	64	17,3	173	81
Прикарпатье	346	11,5	16,2	232	209	20,9	318	191

Сценарий UKMO

Полесье	186	11,6	18,5	242	165	17,7	253	93
Лесостепь	174	12,3	19,0	187	108	18,3	245	16
Северная степь	131	13,1	20,1	105	65	18,2	171	98
Южная степь	106	10,6	18,5	120	63	18,4	177	104
Прикарпатье	265	12,4	17,8	237	189	20,6	291	121

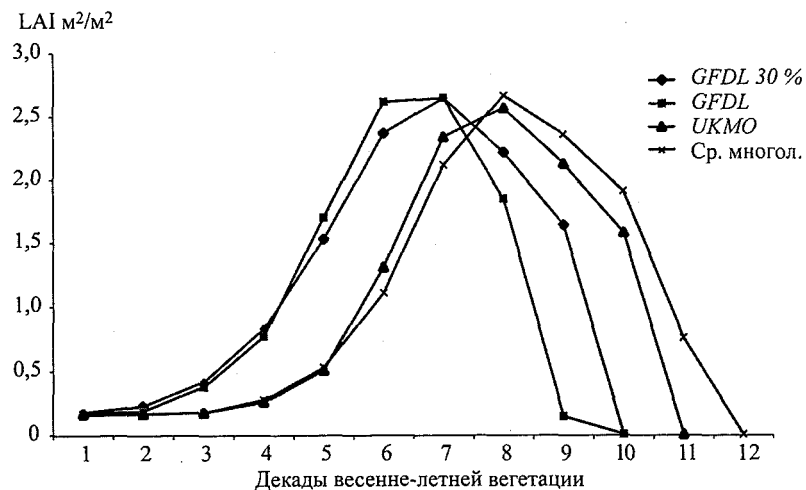


Рис. 1. Динамика относительной площади листьев (LAI) озимой пшеницы при условиях реализации различных сценариев изменений климата по сравнению со средними многолетними значениями. Полесье.

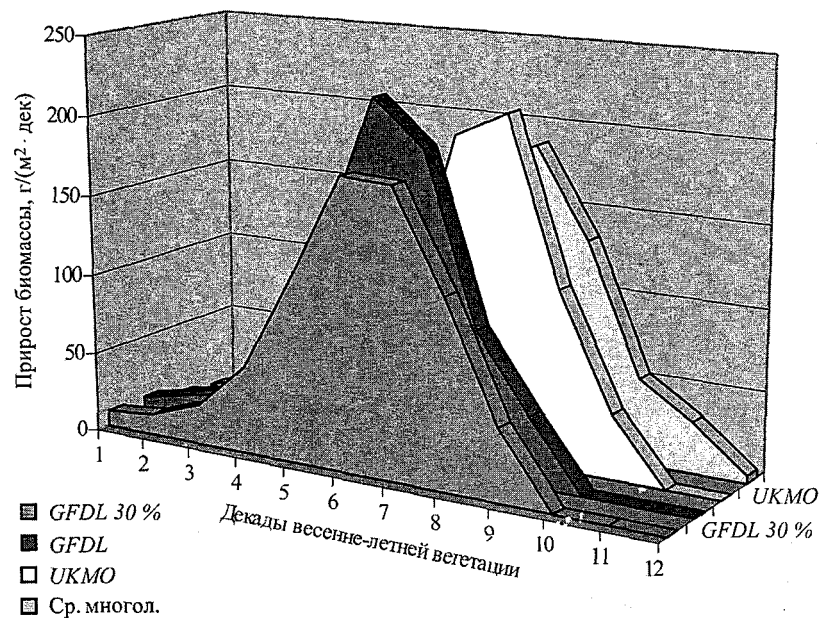


Рис. 2. Динамика приростов общей биомассы озимой пшеницы при условиях реализации различных сценариев изменений климата по сравнению со средними многолетними значениями. Полесье.

В условиях лесостепи, северной и южной степи относительная площадь листьев будет в 1,2—1,4 раза выше обычного уровня (табл. 5). Возрастет фотосинтетический потенциал посевов, что в сочетании с повышением чистой продуктивности фотосинтеза от 6,2—6,8 до 7,2—7,8 г/(м²·сут) приведет к увеличению в 1,4 раза наибольших за вегетацию приростов общей биомассы до 341—435 г/(м²·дек). Урожай общей биомассы возрастет в 1,2—1,4 раза.

В Прикарпатье и Закарпатье сокращение периода вегетации озимой пшеницы на 13 дней и некоторое ухудшение условий влагообеспеченности посевов (см. табл. 4) приведет к формированию меньших размеров ассимилирующего аппарата и уменьшению времени его функционирования, что обусловит снижение урожая общей биомассы до 905 г(с.в)/м².

Таким образом, при условии реализации климатического сценария *GFDL* в западной части Полесья можно ожидать некоторое снижение урожайности (см. рис. 3). На остальной территории Полесья возможен рост урожайности до 110 % по отношению к современному уровню. Агроклиматические условия лесостепи будут обуславливать повышение уровня урожайности до 111—120 % современного уровня. В северной и южной степи сложатся благоприятные условия для формирования продуктивности озимой пшеницы, которые могут привести к существенному повышению урожайности (см. рис. 4). Меньшим этот рост урожайности будет в северной степи, особенно в ее восточной части (Донецкая и Луганская области), и большим (до 130 % современного уровня и более) в южной степи. В Закарпатской и Ивано-Франковской областях ожидается уменьшение урожайности.

Климатический сценарий GFDL 30 %. Предполагается, что осенняя вегетация озимой пшеницы по сравнению со средними многолетними будет проходить в значительно более поздние сроки (см. табл. 2) в условиях повышенного (на 0,7—2,0 °C) температурного режима (см. табл. 3). Продолжительность периода перезимовки в Полесье и лесостепи сократится на 1,5 месяца, а в Прикарпатье и Закарпатье, северной и южной степи — практически вдвое. Средняя температура воздуха наиболее холодной зимней декады повысится на 6—8 °C и станет положительной.

Количество осадков за период от посева озимой пшеницы до прекращения вегетации в Полесье и лесостепи может увеличиться на 12—16 %, а в северной и южной степи — на 27—43 %. Только в Прикарпатье и Закарпатье вероятно уменьшение количества осадков до 90 % климатической нормы. Количество осадков за один день периода зимовки в Прикарпатье и Закарпатье, лесостепи и северной степи увеличится до 1,5—1,7 мм/сут, а в Полесье и южной степи уменьшится до 1,2—1,3 мм/сут.

Начало возобновления вегетации озимой пшеницы наступит на месяц ранее обычных сроков (см. табл. 2). В период от возобновления вегетации до колошения во всех природно-климатических зонах будет наблюдаться пониженный (на 0,8—2,1 °C) температурный режим (см. табл. 4). В По-

Таблица 5

Фотосинтетическая продуктивность озимой пшеницы (среднегодовые данные согласно различным климатическим сценариям)

Природно-климатическая зона	Период максимального роста		За период вегетации			
	Площадь листовой поверхности, м ² /м ²	Прирост общей сухой массы, г/(м ² ·дек.)	Фотосинтетический потенциал, м ²	Чистая продуктивность фотосинтеза, г/(м ² ·сут)	Урожай общей биомассы, г(с.в)/м ²	Коэффициент хозяйственной эффективности
Среднегодовые данные						
Полесье	2,67	187,2	123,1	5,45	750,7	0,35
Лесостепь	3,97	313,3	173,9	6,25	1193,2	0,32
Северная степь	2,98	251,0	130,7	6,53	929,1	0,33
Южная степь	2,73	246,9	117,3	6,80	900,8	0,32
Прикарпатье	3,35	243,8	161,2	5,49	1026,2	0,30
Сценарий GFDL						
Полесье	2,65	220,3	106,8	8,53	805,0	0,34
Лесостепь	4,90	435,4	186,3	7,24	1390,8	0,30
Северная степь	3,89	340,6	144,3	7,17	1165,9	0,31
Южная степь	3,70	351,0	140,1	7,77	1222,8	0,33
Прикарпатье	2,83	230,7	130,4	5,88	905,4	0,31
Сценарий GFDL 30 %						
Полесье	2,65	179,3	122,9	5,38	755,3	0,32
Лесостепь	4,40	322,9	192,6	6,38	1239,1	0,33
Северная степь	4,32	324,2	182,1	7,34	1293,1	0,33
Южная степь	3,41	265,8	159,4	5,94	1112,4	0,36
Прикарпатье	2,92	202,8	150,1	5,22	896,5	0,32
Сценарий UKMO						
Полесье	2,57	211,9	111,8	5,62	736,2	0,35
Лесостепь	3,81	340,1	155,1	6,79	1215,1	0,32
Северная степь	3,27	270,8	130,4	6,74	1016,3	0,31
Южная степь	2,52	296,4	122,9	7,50	1066,7	0,32
Прикарпатье	2,89	233,8	137,2	5,20	871,5	0,29

лесье, лесостепи и северной степи период колошение — восковая спелость будет проходить практически на фоне обычных температур воздуха, а в южной степи, Прикарпатье и Закарпатье температура воздуха понизится по сравнению с нормой на 0,9—2,3 °С.

Во всех природно-климатических зонах будет наблюдаться смещение времени наступления созревания (фазы восковой спелости) в сторону более ранних сроков (на 30—37 дней).

Количество осадков за период вегетации озимой пшеницы в Полесье, лесостепи, Прикарпатье и Закарпатье уменьшится до 75—91 % по сравнению с климатической нормой. В северной и южной степи сумма осадков сохранится практически на прежнем уровне. Средние за период возобновление вегетации — колошение запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в Полесье, лесостепи и в северной степи составят 113—119 % средних многолетних значений (рис. 3). В северной степи в начальные 6—7 декад весенне-летней вегетации запасы продуктивной влаги удерживаются на существенно более высоком уровне. Особенно благоприятными будут условия влагообеспеченности в южной степи. Ожидается, что в Прикарпатье и Закарпатье запасы продуктивной влаги в период весенне-летней вегетации составят 88—92 % средних многолетних значений.

Максимальная площадь листьев озимой пшеницы сформируется в Полесье на две декады раньше обычных сроков (см. рис. 1) и останется на уровне обычной (см. табл. 5). На таком же уровне сформируется и фотосинтетический потенциал посевов (до 122,9 м²/м² за вегетационный пе-

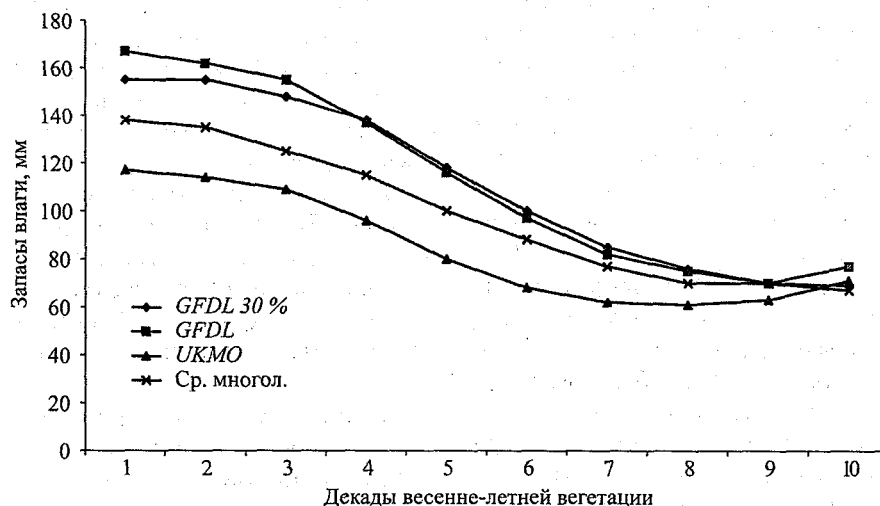


Рис. 3. Динамика запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под озимой пшеницей при условиях реализации различных сценариев изменений климата по сравнению со средними многолетними значениями. Северная степь.

риод). Наибольшие за вегетацию приросты общей биомассы (до $179,3 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{дек})$) будут наблюдаться на 2—3 декады раньше обычного (см. рис. 2). Урожай общей биомассы будет практически на уровне среднего многолетнего.

Более благоприятные условия для фотосинтетической продуктивности посевов озимой пшеницы сложатся в лесостепи, северной и южной степи. Особенно благоприятные условия ожидаются в степной зоне, где значительно изменится динамика площади листьев по сравнению со средней многолетней динамикой. Ожидается ее более высокий уровень в период максимального развития растений (в 1,2—1,4 раза выше обычного уровня) и в 1,4 раза возрастет фотосинтетический потенциал посевов, что приведет к значительному повышению общей продуктивности.

Ухудшение условий влагообеспеченности посевов в Прикарпатье и Закарпатье (см. табл. 4) приведет к снижению всех показателей фотосинтетической продуктивности посевов (см. табл. 5). Сформируется меньшая площадь листьев ($2,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$ по сравнению с $3,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$) и меньший фотосинтетический потенциал посевов (0,93 многолетнего).

В итоге, реализация климатического сценария *GFDL 30 %* (см. рис. 5) приведет к некоторому росту урожайности в Полесье (до 111—120 % современного уровня). В правобережной части лесостепи ожидается повышение уровня урожайности до 111—120 %, а в левобережной — до 121—130 % современного уровня. В северной и южной степи сложатся условия, которые будут наиболее благоприятными для формирования урожайности озимой пшеницы: повышение урожайности будет достигать более 130 % современного уровня. Меньшим будет повышение урожайности в восточной части северной степи. В областях Прикарпатья и Закарпатья уровень ожидаемой урожайности существенно не изменится.

Климатический сценарий UKMO. Посев и прекращение вегетации растений озимой пшеницы будут наблюдаться на месяц позже обычных сроков (см. табл. 2). Практически во всех природно-климатических зонах, за исключением крайнего юга, осенняя вегетация будет проходить на фоне более низких температур (на $0,4$ — $1,6 \text{ }^\circ\text{C}$) по сравнению с климатической нормой (см. табл. 3). Произойдет значительное повышение температуры в зимний период. Средняя температура воздуха наиболее холодной зимней декады повысится на 4 — $6 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом продолжительность зимнего покоя растений сократится более чем в 2—3 раза.

Сумма выпавших за период от посева до прекращения вегетации озимой пшеницы осадков увеличится в Полесье, лесостепи, северной и южной степи (на 27—33 %). Менее значительным это увеличение будет в Прикарпатье и Закарпатье (до 11 %).

Количество осадков на один день периода перезимовки несколько увеличится и почти во всех природно-климатических зонах (за исключением южной степи) составит от 1,8 до 2,1 мм/сут.

Возобновление вегетации озимой пшеницы будет наблюдаться на 1—2 месяца раньше многолетних сроков (см. табл. 2). Прохождение периода от возобновления вегетации до колошения в Полесье, лесостепи и южной степи будет происходить на фоне пониженных на 0,6—2,7 °C температур воздуха (см. табл. 4). В северной степи, Прикарпатье и Закарпатье температура воздуха сохранится на среднем многолетнем уровне. В период колошение — восковая спелость в Полесье, лесостепи, северной степи, Прикарпатье и Закарпатье произойдет повышение на 0,9—2,4 °C температур воздуха. В южной степи будет наблюдаться отрицательная аномалия температуры воздуха (–0,9 °C). Время наступления у растений фазы восковой спелости сместится в сторону более ранних сроков.

Ожидается уменьшение суммы осадков за период весенне-летней вегетации во всех природно-климатических зонах до 60—93 % климатической нормы. Средние за период возобновление вегетации — колошение запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в северной степи, Прикарпатье и Закарпатье составят 94 % средних многолетних значений, а в период колошение — восковая спелость понизятся до 72—80 % нормы. В южной степи в течение всей вегетации сложатся благоприятные условия влагообеспеченности посевов.

Показатели фотосинтетической продуктивности посевов озимой пшеницы в условиях Полесья, лесостепи и северной степи будут близкими к средним многолетним. Это обусловит и соответствующие близкие к обычному уровню значения урожайности общей биомассы (см. табл. 5). Только в условиях южной степи сочетание более высокого фотосинтетического потенциала и более высокого уровня чистой продуктивности фотосинтеза приведет к увеличению урожая общей биомассы в 1,2 раза. Для Прикарпатья и Закарпатья будет характерен более низкий уровень показателей фотосинтетической продуктивности посевов озимой пшеницы.

Такая динамика показателей фотосинтетической продуктивности посевов озимой пшеницы свидетельствует о том, что реализация климатического сценария *УКМО* будет менее благоприятной для формирования продуктивности озимой пшеницы в Украине по сравнению с другими климатическими сценариями. Следует ожидать, что в западной части Полесья урожайность повысится до 111—120 % среднего многолетнего, а на остальной территории Полесья останется на современном уровне (см. рис. 6). Для лесостепной зоны будет характерно повышение урожайности в западной части и уменьшение в восточной. Ожидается, что в центральной части северной степи урожайность будет составлять 101—110 %, а в восточной части — 91—100 % современного уровня. Предполагается значительное увеличение урожайности в южной степи (до 121—130 % современного уровня). На территории Прикарпатья и Закарпатья следует ожидать существенного уменьшения уровня урожайности.

**Колебания валового сбора зерна озимой пшеницы в Украине
в связи с изменением климата**

На основании сценариев изменения климата были оценены возможные колебания валового сбора зерна озимой пшеницы в Украине с вероятностью 99 %. За базовую принималась посевная площадь озимой пшеницы в Украине по состоянию на 2001 г. При современных климатических условиях минимальный валовой сбор зерна озимой пшеницы может снижаться до 9,95 млн. т, а максимальный — повышаться до 25,39 млн. т (табл. 6). При условии реализации рассмотренных сценариев изменения климата минимальный валовой сбор зерна озимой пшеницы в Украине может возрасти до 12,37—14,20 млн. т. Это составит 124—143 % по отношению к минимальному валовому сбору при современных климатических условиях. Максимальный валовой сбор зерна озимой пшеницы может увеличиться до 27,02—29,85 млн. т, что по отношению к современному уровню составит 106—118 %.

Таблица 6

**Колебания валовых сборов зерна озимой пшеницы (млн. т)
с обеспеченностью 99 % по средним многолетним климатическим условиям
и различным сценариям изменения климата**

Природно-климатическая зона	Климатические условия		Сценарии изменения климата					
			GFDL		GFDL 30 %		UKMO	
	Минимальный сбор	Максимальный сбор	Минимальный сбор	Максимальный сбор	Минимальный сбор	Максимальный сбор	Минимальный сбор	Максимальный сбор
Полесье	0,64	1,77	0,63	1,92	0,79	1,88	0,76	1,78
Лесостепь	4,41	9,85	5,15	11,46	5,58	11,01	4,59	9,98
Северная степь	1,65	4,69	1,93	5,16	2,54	5,60	1,64	4,86
Южная степь	2,99	8,54	4,75	10,74	5,06	10,41	4,58	9,89
Закарпатье и Прикарпатье	0,26	0,54	0,25	0,57	0,23	0,52	0,26	0,5
По Украине	9,95	25,39	12,71	29,85	14,20	28,09	12,37	27,02

Обсуждение

Представляет интерес сравнение полученных нами по трем рассматриваемым климатическим сценариям (*GFDL*, *GFDL 30 %*, *UKMO*) оценок повышения продуктивности озимой пшеницы в Украине с представленными в работе (Сиротенко, 1991) оценками биоклиматического потенциала, относящимися к территории Украины. Этот показатель представляет собой

суммарную продуктивность сухой надземной биомассы травяной агроэкосистемы. Рассматривались три региона бывшей УССР (Юго-западный, Донецко-Приднепровский и Южный). Результаты расчетов ожидаемых изменений продуктивности выполнены по двум палеоклиматическим сценариям изменения климата — климатических оптимумов голоцена (ОГ) и микулинского межледникового (ОММ). Отмечается, что при реализации сценария ОГ наибольшее повышение продуктивности будет в Южном регионе, в то время как в Донецко-Приднепровском регионе возможно незначительное уменьшение продуктивности, а в Юго-западном — незначительное увеличение.

По полученным нами данным, приведенным на рис. 4—6, видно, что степная зона Украины выделяется значительным повышением уровня урожайности зерна озимой пшеницы (при реализации всех трех климатических сценариев). Для ее восточной части (Донецкой и Луганской областей) характерен меньший рост продуктивности по климатическим сценариям *GFDL* и *GFDL 30 %*, а при реализации климатического сценария *УКМО* ожидается некоторое уменьшение урожайности зерна по сравнению с современным уровнем.

При реализации сценария ОММ ожидалось повышение продуктивности в рассматриваемых трех регионах (Сиротенко, 1991), особенно значительное в Южном регионе, что также согласуется с результатами наших исследований о повышении уровня урожайности озимой пшеницы в степной зоне Украины при возможном изменении климата.

В работе (Израэль, Сиротенко, 2003) рассматривается изменение биоклиматического потенциала регионов России при реализации климатического сценария *GFDL*. Для сравнения с результатами, полученными в наших исследованиях, наибольший интерес представляют данные, относящиеся к сопредельному с Украиной региону России: Центрально-Черноземному. Предполагается (Израэль, Сиротенко, 2003), что при трех транзитивных сценариях изменения климата и увеличении содержания CO_2 в атмосфере рост биоклиматического потенциала в этом регионе в ближайшие 30—70 лет составит 12—24 %. При этом уровень урожайности зерновых по отношению к современному уровню повысится на 15 %. В дальнейшем ожидается некоторое снижение уровня биоклиматического потенциала, а уровень урожайности зерновых культур опустится ниже современного. Аналогичные результаты приведены и в работе (Бобылев, 2003). По данным наших исследований (см. рис. 4, 5), при реализации климатических сценариев *GFDL* и *GFDL 30 %* в Украине ожидается повышение уровня урожайности зерна озимой пшеницы в среднем на 15—17 %.

Вместе с тем, в работе (Израэль, Сиротенко, 2003) делается вывод о небольшом росте продуктивности зерновых в Украине (до 10 %) в ближайшие 30—40 лет и сохранении современного уровня урожайности зерновых культур через 60—70 лет. Для территории Белоруссии этот вывод бо-

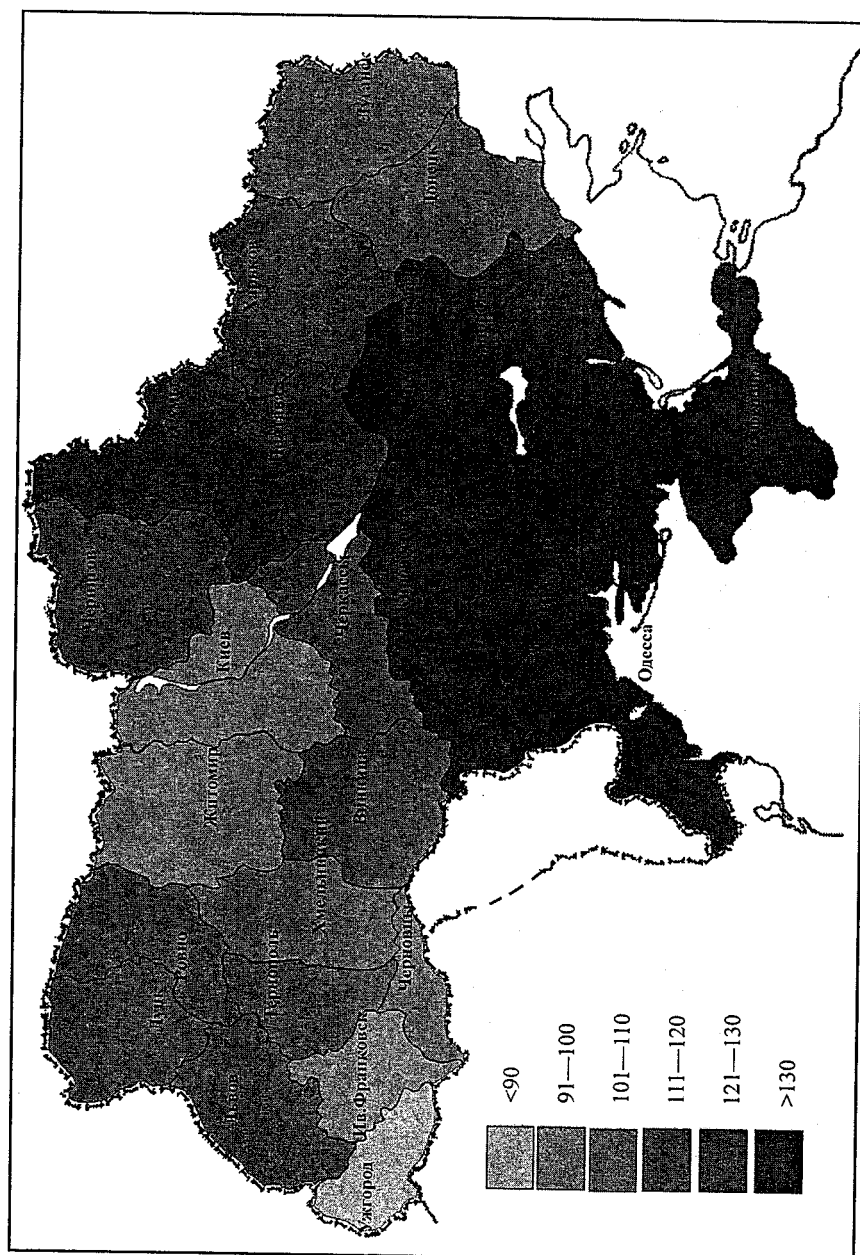
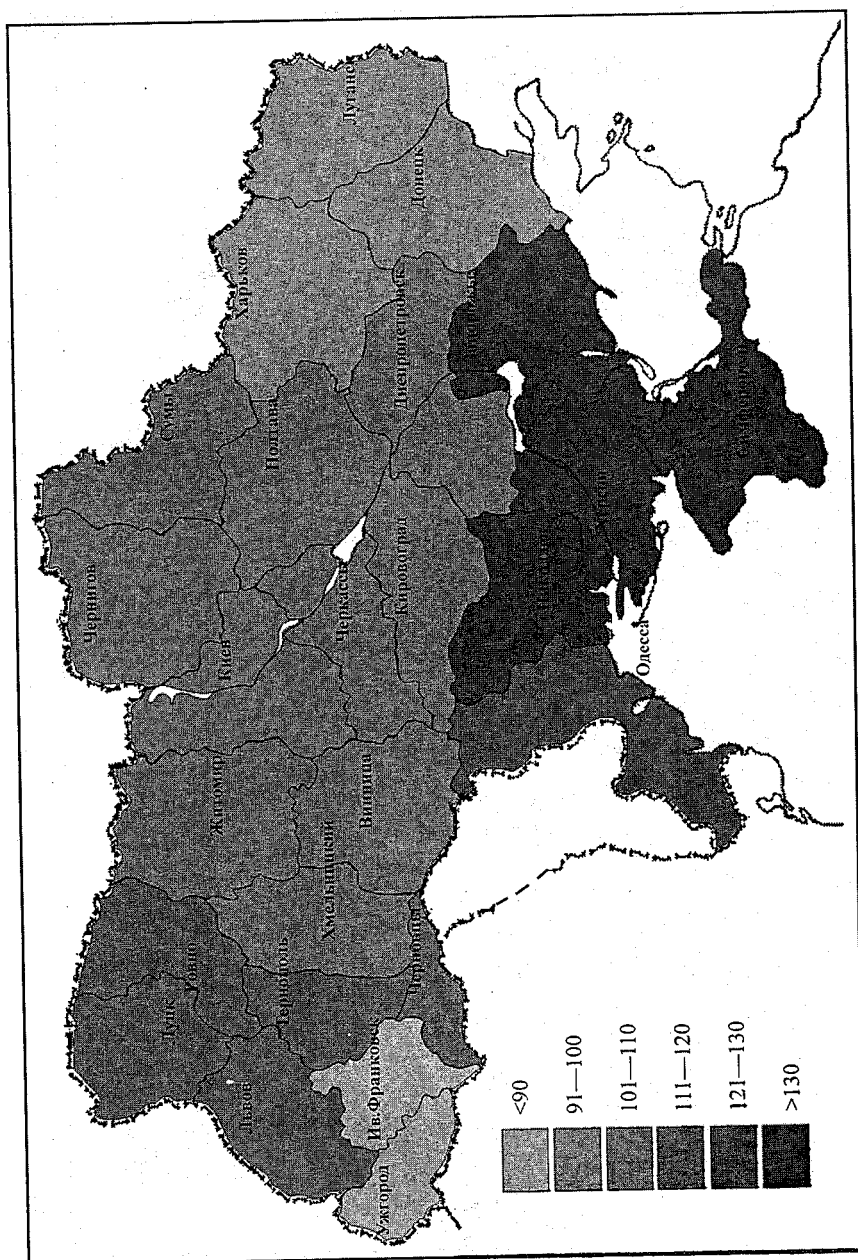


Рис. 5. Оценка ожидаемой урожайности озимой пшеницы (в % от современного уровня). Сценарий *GFDL*.



более оптимистичен. Следует отметить, что, по нашим оценкам, в примыкающей к Белоруссии природно-климатической зоне Полесья ожидается повышение уровня урожайности зерна озимой пшеницы как при 30-процентном повышении содержания CO₂ в атмосфере, согласно климатическому сценарию *GFDL* (см. рис. 5), так и при удвоении этой величины (см. рис. 4). На остальной территории Украины предполагается более высокий рост урожайности, особенно в степной зоне.

Некоторые расхождения полученных нами оценок с представленными в работе (Израэль, Сиротенко, 2003) результатами объясняются следующими обстоятельствами. В работе (Израэль, Сиротенко, 2003) оценивалась реакция яровых зерновых культур, активная вегетация (всходы) которых начинается на 2—3 декады позже, чем возобновление озимой пшеницы, а время наступления фазы восковой спелости также проходит на более поздние сроки, чем у озимой пшеницы. Таким образом, большая часть вегетационного периода яровых культур попадает в более напряженные по сравнению с весенне-летним периодом вегетации озимой пшеницы агрометеорологические условия. Нами же рассматривались все периоды вегетации культуры озимой пшеницы при условии реализации климатических сценариев *GFDL* и *GFDL 30 %*. Ожидается, что в этих условиях период осенней вегетации озимой пшеницы будет более чем на месяц сдвинут вперед (см. табл. 2) и будет проходить при более лучших условиях влагообеспеченности (см. табл. 3). Значительное потепление в зимний период приведет к тому, что возобновление вегетации озимой пшеницы произойдет более чем на месяц раньше обычного (см. табл. 2). Весенне-летняя вегетация растений будет проходить, особенно в критический по отношению к влаге период (до колошения), а в южной степи и в период колошения — восковая спелость, при существенно лучших условиях влагообеспеченности (см. табл. 4). Такие агроклиматические условия вегетации озимой пшеницы определят более близкое к оптимальным показателям сочетание всех показателей фотосинтетической продуктивности посевов (см. табл. 5). В итоге это приведет к повышению урожайности зерна по сравнению с существующим уровнем.

Выводы

При условии реализации рассмотренных сценариев изменений климата имеются основания полагать, что ожидаемые погодные условия будут более благоприятными для возделывания озимой пшеницы в Украине.

1. На основе оценки агроклиматических условий осенней вегетации озимой пшеницы установлено, что благоприятные условия осенней вегетации вследствие изменения климата позволят на 40—50 дней сместить сроки сева озимой пшеницы, что позволит более эффективно использовать благоприятные условия осенней вегетации.

2. Оценка агроклиматических условий перезимовки озимой пшеницы показала, что ожидаются более благоприятные условия перезимовки растений. Период зимнего покоя будет проходить при повышенных на 4—8 °С температурах воздуха. Сумма отрицательных температур, характеризующих условия перезимовки, уменьшится более чем в 3—4 раза по сравнению с обычной суммой зимних температур. Продолжительность периода зимовки сократится на 1,5—2 месяца.

3. Возобновление вегетации растениями озимой пшеницы произойдет более чем на месяц раньше обычных сроков. Период от возобновления вегетации до колошения будет проходить при пониженном (на 1—2 °С) температурном режиме. При реализации климатических сценариев *GFDL*, *GFDL 30 %* в лесостепи, северной и южной степи сложатся благоприятные условия для фотосинтетической продуктивности посевов: относительная площадь листьев будет в 1,2—1,4 раза больше обычного, фотосинтетический потенциал посевов увеличится в 1,1—1,4 раза, что приведет к повышению общей продуктивности посевов в 1,2—1,4 раза. Сроки наступления у растений фазы восковой спелости сместятся в сторону более ранних сроков на один-два месяца.

4. Реализация климатических сценариев *GFDL*, *GFDL 30 %* в Полесье, лесостепи, северной и южной степи приведет к повышению урожайности озимой пшеницы до 111—130 % и более по сравнению с современным уровнем. Условия, которые сложатся при реализации климатического сценария *UKMO*, будут менее благоприятны для формирования продуктивности озимой пшеницы в Украине по сравнению с другими климатическими сценариями. По всем трем рассмотренным климатическим сценариям, особенно благоприятными для формирования урожая озимой пшеницы будут агроклиматические условия в южной степи.

5. Оценка возможных колебаний урожайности и валового сбора зерна озимой пшеницы показала, что при условии реализации рассмотренных сценариев изменения климата можно ожидать увеличения валового сбора зерна озимой пшеницы в Украине. Минимальный валовой сбор зерна возрастет до 12,37—14,20 млн. т, что по сравнению с минимальным валовым сбором зерна при современных климатических условиях составит 124—143 %. Максимальный валовой сбор зерна озимой пшеницы может увеличиться до 27,02—29,85 млн. т, что по отношению к современному уровню составит 106—118 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобылев С. Н. 2003. Воздействие изменения климата на сельское хозяйство и водные ресурсы России. — М.: Фонд „Защиты природы”. — 35 с.

Жуков В. А., Святкина О. А. 2000. Стохастическое моделирование и прогноз агроклиматических ресурсов при адаптации сельского хозяйства к региональным изменениям климата на территории России. — Метеорология и гидрология, № 1, с. 100—109.

- Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д. 2003. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России. — Метеорология и гидрология, № 6, с. 5—17.
- Кобак К. И., Кондрашева Н. Ю. 1992. Глобальное потепление и природные зоны. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 91—98.
- Логинов В. Ф. 1992. Причины и следствия климатических изменений. — Минск: Наука і техника. — 320 с.
- Менжулин Г. В. 1986. Методы расчета фотосинтеза растительных сообществ при достаточном увлажнении. — Труды ГГО, вып. 229, с. 81—103.
- Полевой А. Н. 1983. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. — Л.: Гидрометеиздат. — 175 с.
- Полевой А. Н. 1988. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. — Л.: Гидрометеиздат. — 318 с.
- Полевой А. Н. 2003. Методы оценки агрометеорологических условий формирования продуктивности и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в Украине. — „Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища — 2002”. Доповіді до ювілейної міжнародної конференції, присвяченій 70-річчю утворення Одеського державного екологічного університету, ч. 1. — Одеса, с. 13—18.
- Полевой А. Н., Кульбида Н. И. 2001. Моделирование формирования урожая озимой пшеницы в период весенне-летней вегетации в Украине. — В сб.: Метеорология, климатология и гидрология. — Одесса, № 43, с. 127—135.
- Проблеми і стратегія виконання Україною рамкової конвенції ООН про зміну клімату. 2001 / В. Я. Шевчук, І. В. Трофимова, О. М. Трофимчук та ін. — Київ, УІНЦІРБ. — 96 с.
- Росс Ю. К., Бихеле З. Н. 1968. Расчет фотосинтеза растительного покрова. — В кн.: Фотосинтез и продуктивность растительного покрова. — Тарту: Изд. ИФА АН ЭССР, с. 46—74.
- Сиротенко О. Д. 1991. Имитационная система климат — урожай СССР. — Метеорология и гидрология, № 4, с. 67—73.
- Сиротенко О. Д. 2000. Будущее сельского хозяйства России в связи с ожидаемыми изменениями климата. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — СПб.: Гидрометеиздат, т. 17, с. 258—274.
- Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. 1998. Агроклиматические ресурсы и физико-географическая зональность территории России при глобальном потеплении. — Метеорология и гидрология, № 3, с. 92—103.
- Тооминг Х. Г. 1977. Солнечная радиация и формирование урожая. — Л.: Гидрометеиздат. — 200 с.
- Україна та глобальний парниковий ефект. 1998. Книга 2. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату / За ред. В. В. Васильченка, М. В. Рапцуна, І. В. Трофимової. — Київ: Агенство раціонального використання енергії та екології. — 208 с.
- Фотосинтез, продукционный процесс и продуктивность растений. 1989 / Б. И. Гуляев, И. И. Рожко, А. Д. Рогаченко и др. — Киев: Наукова думка. — 151 с.
- Climate Change 2001. Impacts, Adaptations and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton J. T. et al., editors) — Cambridge University Press. — 1032 p.
- Climate Change and its Impacts in Mongolia. 2000 / P. Ratima, D. Dagvadorj, ed. — Ulaanbaatar. — 227 p.
- Curry R. B. 1971. Dynamic simulation of plant growth / 1. Development of a model. — Trans. ASAE, vol. 14, N 5, p. 946—959.

Imai K., Murata Y. 1976. Effect of carbon dioxide concentration on growth and dry matter production of crop plants. I. Effect on leaf area, dry matter tillering, dry matter distribution ratio and transpiration. — *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.*, 45, N 4, p. 598—606.

Kimball B.A. 1981. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. — *Agron. J.*, 75, N 6, p. 779—787.

McCree K. J. 1970. Anequation for the rate of respiration of white clover plants growth under controlled condition. /In: *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. — Wageningen, Pudoc, p. 221—229.

Sionit N., Hellmers H., Strain B.R. 1980. Growth and yield of wheat under CO₂ enrichment and water stress. — *Crop Sci.*, 20, N 6, p. 687—690.

Weather/climate and sustainable agricultural production and protection. 1997 / A. Brunetti, P. Ford et al. CAgM Report, N 74. WMO/TD-N 838. — Geneva. — 111 p.

РОЛЬ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ РОССИИ В ПОГЛОЩЕНИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ АТМОСФЕРЫ

А. А. Романовская, М. Л. Гитарский, Р. Т. Карабань, И. М. Назаров*

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии, ARomanovskaya@comail.ru

Реферат. Рассматривается ежегодное изменение содержания углерода в почвах при естественном зарастании залежных земель на территории Российской Федерации, выведенных из сельскохозяйственного использования в 1990—2002 гг. Общая площадь этих земель составляет 21,6 млн. га. Выполнена прогнозная оценка изменения запаса углерода до 2010 г. При исследовании изменения запаса углерода в почвах использовался метод математического моделирования (модель ROTHC). Территория России была разделена на 40 регионов, для которых определены усредненные базовые почвенные и климатические характеристики и поступление органического вещества в почвы при зарастании. Средняя нетто-эмиссия углерода с территории залежных земель в 1990—1999 гг. составляла $2,1 \pm 1,8$ Мт С/год. В 2000—2002 гг. наблюдалось поглощение атмосферного углерода почвами залежей; его среднее значение было $5,2 \pm 2,8$ Мт С/год. К 2010 г. общее увеличение запаса органического углерода в зарастающих почвах страны может составить 153 Мт С, что соответствует поглощению из атмосферы 561 Мт CO_2 . Наибольшая интенсивность аккумуляции углерода наблюдается в центральных областях Европейской части России, на юге Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Таким образом, залежные земли выступают в качестве значимого поглотителя углекислого газа и должны быть учтены при выполнении инвентаризаций парниковых газов в стране.

Ключевые слова. Почвенный углерод, залежные земли, естественное зарастание, парниковые газы, сток углекислого газа, аграрный сектор России.

A ROLE OF ABANDONED LAND OF RUSSIA IN THE REMOVAL OF CARBON DIOXIDE FROM THE ATMOSPHERE

A. A. Romanovskaya, M. L. Gytarsky, R. T. Karaban', I. M. Nazarov*

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, ARomanovskaya@comail.ru

Abstract. Annual changes in soil carbon stock are considered for the abandoned managed agricultural lands that were under natural regrowth over the territory of Russia within the period 1990—2002. Total area of abandoned agricul-

tural land is 21,6 millions ha. The projections of changes in the carbon stock have been made for the period from present to 2010. The RothC model was employed in the investigation of carbon dynamics in soils. The territory of Russia was subdivided into 40 regions. The average basic soil and climatic parameters, as well as the annual input of organic matter into soils due to natural succession were estimated for each region. Average annual net emission over the territory of abandoned lands was $2,1 \pm 1,8$ Mt C/yr in 1990—1999. CO₂ removal from the atmosphere by soils was $5,2 \pm 2,8$ Mt C/yr on average in 2000—2002. A total increase in carbon stock of the abandoned lands over the country can be as high as 153 Mt C (that corresponds to the removal of 561 Mt of CO₂ from the atmosphere) in 2010. Central regions of the European part of Russia, south of East Siberia and the Far East will have the highest intensity of carbon sequestration. Thus abandoned lands represent a considerable sink for carbon dioxide from the atmosphere and therefore, should be included in the annual national greenhouse gas emission inventory.

Keywords. Soil carbon, abandonment, regrowth, greenhouse gases, carbon dioxide, removal, agricultural sector, Russia.

Введение

Диоксид углерода является основным антропогенным парниковым газом, повышенная эмиссия которого способна оказывать влияние на оптические свойства атмосферы, что, в свою очередь, может привести к глобальному изменению климата. В соответствии с принятой в 1992 г. Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (РКИК) и Киотским протоколом к ней (1997 г.) перед Россией стоит задача ежегодной инвентаризации потоков парниковых газов во всех секторах экономики, включая сельское и лесное хозяйства с учетом изменения землепользования. В связи с этим оценка величины потоков основных парниковых газов начиная с 1990 г., который принят базовым годом конвенции, и их краткосрочный и долгосрочный прогнозы позволят получить достоверную информацию, необходимую для принятия решений по более надежному контролю и сокращению эмиссий парниковых газов в России.

Почвы играют важную роль в глобальном цикле углерода и могут обуславливать как его поглощение, так и эмиссию в атмосферу. Согласно международным оценкам, запас органического углерода в почвах мира составляет около 1350 млрд. т (Houghton, 1999), что соответствует примерно 80 % общего содержания этого элемента во всех компонентах наземных экосистем, включая растительность (IPCC, 2000). Антропогенные воздействия на почву изменяют в них запас углерода и, таким образом, воздействуют на его глобальный цикл в атмосфере и биосфере. Одним из основных типов антропогенной деятельности является изменение вида землепользования. Так, вырубка леса и распашка целинных и залежных земель

сопровождаются значительными потерями почвенного углерода и соответственно эмиссией CO_2 в атмосферу, в то время как естественное зарастание неэксплуатируемых пахотных угодий приводит к постепенному восстановлению естественного состояния почв и накоплению углерода. Так, согласно оценкам Houghton (2003), глобальная ежегодная эмиссия углерода в атмосферу при изменении землепользования составляет $2,2 \pm 0,8$ млрд. т С/год. При этом основной вклад в эмиссию вносит сведение лесов в тропиках как результат подсечной системы земледелия. По данным Houghton, в 1990-х годах в Северной Америке и Европе наблюдался незначительный сток атмосферного углерода ($-0,1$ и $-0,02 \pm 0,2$ млрд. т С/год соответственно), в то же время с территорий бывшего Советского Союза отмечалась сравнительно слабая эмиссия $0,02 \pm 0,2$ млрд. т С/год (Houghton, 2003). Однако если учесть, что в России в течение последних лет не производилось распашки целинных земель, а площади зарастающих пахотных угодий, выведенных из сельскохозяйственного пользования, значительно увеличились, то следует ожидать роста ежегодного стока углерода с конца 1990-х годов при изменении землепользования на территории этой страны.

Цель настоящей работы — определение ежегодного потока атмосферного углерода с залежных земель в России за период 1990—2002 гг., а также прогноз стоков CO_2 на период до 2010 г.

Методы и материалы

В качестве объекта исследований были выбраны залежные почвы России, сельскохозяйственное использование которых прекратилось в период 1990—2002 гг. включительно. Согласно положениям РКИК и Киотского протокола (1997), не рассматривались земли, выведенные из пользования до 1990 г., хотя в них также может продолжаться накопление или потеря почвенного углерода в течение указанного периода.

Общие площади залежных земель определялись на основании официальных данных Минсельхоза РФ по пахотным угодьям, переводимым в категорию земель государственного запаса. При этом распределение суммарных площадей этих земель по областям России было выполнено соответственно доле пашни каждой области в регионе. Кроме того, для более полного учета залежных земель по данным государственной статистики (Сельское хозяйство в России, 1995; 2002) были рассчитаны площади брошенных пахотных земель, которые условно приняты за сельскохозяйственные, как разница между общей площадью пахотных земель и суммой площадей посевов и паров в области.

Динамика органического углерода в зарастающих землях России оценивалась методом математического моделирования, позволяющим учесть весь комплекс воздействующих факторов на процессы углеродного цикла: климат, тип растительности, физические и химические свойства почвы. Из

большого набора почвенных моделей, разработанных для расчета содержания углерода в аграрных и лесных почвах (Chertov, Komarov, 1996; Coleman, Jenkinson, 1996; Maser et al., 2003; McGill, 1996; Parton, 1996; Post et al., 1996; van Veen, Paul, 1981), была выбрана модель культивируемых почв ROTHС (Coleman, Jenkinson, 1996; Jenkinson, 1990). Известно, что при зарастании пашни в течение первых 20—30 лет структура и свойства сельскохозяйственных почв практически не изменяются. Согласно рекомендации авторов, модель ROTHС пригодна для использования на территории РФ. В качестве исходных данных требуется доступная информация по климату (средняя температура, осадки и испаряемость), почвам (начальное содержание углерода в пахотном слое, глинистость) и растительности (количество поступающих в почву органических остатков). Эта модель позволяет рассчитывать содержание органического углерода ежемесячно и, таким образом, может быть использована при долгосрочном моделировании. Структура модели включает четыре активных компонента органического материала (легкоразлагаемый, устойчивый к разложению растительный материал, микробная биомасса и гумифицированное органическое вещество почвы), а также фракцию гумусного угля почв, устойчивую к микробному разложению.

Для проведения расчетов территория России была разделена на 40 регионов. В основе этого деления находится административное деление страны на области. Небольшие области со сходными климатическими и почвенными показателями были объединены (например, области Центрально-Черноземного региона). Регионы Крайнего Севера (Таймыр, Ямало-Ненецкий, Эвенский, Чукотский автономные округа), по данным Госкомстата России, не имеют пахотных земель (Сельское хозяйство в России, 1995; 2002) и поэтому были исключены из расчета. При определении климатических параметров и характеристик почв в Ханты-Мансийском округе, Якутии, Республике Тува и Красноярском крае рассматривались только их южные районы.

Количество осадков (мм) и среднемесячная температура (°C) для регионов России получены на базе соответствующей метеорологической информации отдельных гидрометеостанций (Справочник по климату..., 1965—1966; Hong-Kong Observatory, 2003) и усреднены. Испаряемость рассчитана в соответствии с методикой Thornthwaite (1948) на основе данных среднемесячной температуры и географической широты исследуемой области/региона.

Для расчета начальной концентрации органического углерода в пахотных почвах использована база данных Болотиной (1976), в которой представлена наиболее подробная информация о процентном содержании гумуса по типам почв, разным биоклиматическим зонам и видам землепользования для всей территории России. Запасы гумуса для отдельных почв Дальнего Востока взяты из работы Соколова и Розова (1976). Концентрация углерода в гумусе принята равной 58 % (Кононова, 1984). Эта величина

на использована для перевода данных по запасам гумуса в единицы содержания органического углерода.

Полученные данные по содержанию углерода в гумусе пахотных почв (0—20 см) были связаны с картой административного деления России. На основании распределения пашни по разным типам почв в исследуемых регионах (областях) (Распределение земельного фонда..., 1980) рассчитана средняя концентрация углерода в гумусе пахотных почв каждой области (региона). Расчет проводился в соответствии с формулой

$$C_{av} = \sum (R_i Cden_i) / 100, \quad (1)$$

где C_{av} — среднее содержание углерода (т С/га) в пахотных почвах области (региона); R_i — доля площади данного типа почв в общей площади пахотных земель области (%); i — основной тип пахотных почв в области, доля которого составляет не менее 1 % общей площади пашни; $Cden_i$ — среднее содержание углерода в слое 0—20 см данного типа пахотной почвы (т С/га).

Используемые базы данных (Болотина, 1976; Соколов, Розов, 1976) содержат общую характеристику механического состава пахотных почв СССР: супесчаные, суглинистые и глинистые почвы. По данным Голубева (1970) определено среднее процентное содержание глины в почвах различной текстуры. Сопоставление полученной информации с процентным соотношением разных типов почв в структуре сельскохозяйственных угодий (Распределение земельного фонда..., 1980) позволило определить содержание глины в изучаемых почвах в среднем по каждой области (региону). Математически расчет производился аналогично уравнению (1), заменяя содержание углерода гумуса в данной почве ($Cden_i$) на ее глинистость ($CLAYden_i$).

Для работы модели необходимо определить начальное содержание углерода во всех активных компонентах органического материала почв (см. выше). Фракция гумусного угля является труднодоступной для разложения и практически не изменяется в течение десятилетий (Jenkinson, 1990), поэтому этот компонент был исключен из расчета. Начальное состояние остальных структурных компонентов рассчитывалось в модели в течение длительного промежутка времени (до 10 000 лет) для климатических и почвенных условий данного региона при разном ежегодном поступлении сельскохозяйственных остатков в почву в соответствии с рекомендациями авторов модели (Coleman, Jenkinson, 1996; Jenkinson, 1990). Расчет начального содержания углерода в активных компонентах органики почв заканчивался после достижения суммарного содержания углерода во фракциях трудноразлагаемого растительного материала, микробной биомассы и гумифицированного органического вещества значения, соответствующего C_{av} — среднему содержанию углерода в почвах этого региона (уравнение (1)), которое определено на основании данных Болотиной (1976). При этом разница этих двух величин (содержание углерода в па-

хотных почвах области/региона, рассчитанное с помощью модели и с использованием литературных данных) оказывалась не более $\pm 0,01$ т С/га.

Растительные остатки озимой ржи и/или озимой пшеницы с учетом климатической зоны и основных видов сельскохозяйственных растений, выращиваемых в области (Сельское хозяйство в России, 1995; 2002), использовались в расчете начального компонентного состава модели. Количество углерода в органических остатках определялось в соответствии с методикой Левина (1977), используемой в наших предыдущих исследованиях (Романовская и др., 2002), и данными по содержанию углерода в биомассе растений (Revised, 1996 Guidelines..., 1997).

Динамика поступления растительных остатков в почву после их выведения из сельскохозяйственного использования определялась на основе регрессионного анализа данных литературы по сукцессиям травяных сообществ на зарастающих землях (Гусев, 1932; Нерсисян, Шур-Багдасарян, 1989; Снакин, 1992; Снытко и др., 1986; 1988; Турганаев, Пестерева, 1976). Известно, что при восстановлении естественных растительных сообществ на залежах наблюдается общая закономерность смены нескольких сукцессионных стадий: бурьянистой, корневищной и плотнодерновинной. В течение первых трех лет доминируют сорные однолетние растения. Вторая стадия восстановления с 4-го по 12—15-й год характеризуются развитием корневищных многолетников, таких как пырей, а в течение третьей стадии (до 17 или до 20—25 лет) преобладают плотнодерновинные злаки и видовая структура сообщества близка к коренной растительности (Микляева, 1996). Окончательное формирование естественных биоценозов происходит после 20—25 лет и заканчивается к 50 годам и более. При этом в зависимости от окружающих биоценозов, рельефа и др. могут формироваться луговые, лесные или степные сообщества (Гусев, 1932; Денисенко и др., 1996). Можно предположить, что в течение первых 20 лет сукцессии, как правило, не происходит формирования сомкнутого древостоя и на всех залежных землях преобладают травяные сообщества. Однако их видовой состав и продуктивность могут сильно варьировать в зависимости от климатической и растительной зон. Поэтому ежегодная продуктивность травяных биоценозов залежных земель в течение первых 25 лет зарастания выражалась как процент от продуктивности сформированных луговых сообществ в данной области, средние значения которой были рассчитаны на основе данных Базилович (1993). Данные о полной биологической продуктивности луговых биоценозов в зонах северной, средней и южной тайги, смешанных и широколиственных лесов, луговой и настоящей степи, а также для горных территорий были усреднены в пределах каждой зоны. Методом сопоставления карт зон вегетации и областного деления страны (Большой советский атлас мира, 1937) были определены процентные соотношения площадей растительных зон в каждой области, на базе которых рассчитывались средние значения продуктивности луговых биоценозов для всех исследуемых регионов. Поскольку в зоне бореальных лесов пой-

менные земли являются наиболее благоприятными для выращивания сельскохозяйственных культур, было условно принято, что основная площадь брошенных пашен в этих регионах приходится на территорию материковых лугов (90 %) и лишь 10 % — на территорию пойменных, которые, по-видимому, выводятся из использования в последнюю очередь.

Предполагалось, что годовая продукция трав численно соответствует количеству поступающих в почву органических остатков. При определении количества углерода в растительных остатках предполагалось развитие естественной сукцессии на данной территории без учета воздействия пастбы, сенокошения, выжигания или других видов антропогенного воздействия. Частичным подтверждением этого предположения могут служить данные государственной статистики по общему валовому сбору сена в России за период 1990—2002 гг., величина которого уменьшилась на 40 % (Сельское хозяйство в России, 1995; 2002). Таким образом, можно заключить, что в стране в течение рассматриваемого промежутка времени дополнительные площади под сенокосы не осваивались.

На основании полученных данных по ежегодной динамике почвенного углерода в залежных землях отдельных областей (регионов) были определены ежегодные и общие изменения углерода в целом на территории России за период 1990—2002 гг. Кроме того, для территории залежных земель в России были вычислены средние арифметические значения ежегодного потока атмосферного углерода в течение 1990—1999 и 2000—2002 гг., а также определены среднеквадратичные отклонения для них.

Результаты

Результаты расчетов показали, что за период 1990—2002 гг. площади зарастающих сельскохозяйственных земель значительно увеличились (табл. 1). Так, в 1990 г. площадь залежных земель составляла 716,7 тыс. га и соответствовала 0,5 % общей площади пахотных земель в России. К 2002 г. эта величина увеличилась до 21,6 млн. га, что составляет 17,4 % пашни. При этом наиболее интенсивное увеличение площадей заброшенных пахотных угодий наблюдалось в годы, последующие за экономическими кризисами в России (1992 и 1998 гг.). Наибольшие площади пахотных земель были оставлены в Центрально-Черноземном, Поволжском, Уральском регионах и Западной Сибири, суммарный вклад которых составляет около 44,8 % общей территории залежей. Минимальный вклад дают области Крайнего Севера и некоторые районы Дальнего Востока, где площадь обрабатываемых земель невелика.

Исходные данные о содержании органического углерода пахотных почв в среднем по территории каждого региона (области) приведены на рис. 1. Наблюдаемая тенденция повышения содержания углерода в пахотных почвах в направлении с севера к центральным регионам Европейской части страны и областям Западной и Восточной Сибири обусловлена уве-

Таблица 1

Площадь залежных земель (тыс. га) в 1990—2002 гг.

№ п/п	Регион (область)	Площадь залежных земель (тыс. га), выведенных из использования													
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Всего
1	Северный	9,83	24,6	21,4	51,6	7,76	26,9	15,1	28,3	13,7	51,9	21,6	9,1	10,7	292,5
2	Вологодская обл.	4,6	11,4	9,9	23,9	3,6	12,5	7,0	13,1	6,4	24,1	10,0	4,2	5,0	135,7
3	Северо-Западный	5,0	12,6	11,0	26,5	4,0	13,8	7,8	14,5	7,0	26,6	11,1	4,6	5,5	150,0
4	Псковская обл.	4,9	12,2	10,7	25,7	3,9	13,4	7,5	14,1	6,8	25,8	10,8	4,5	5,3	145,7
5	Калининград- ская обл.	2,1	5,3	4,6	11,1	1,7	5,8	3,2	6,1	2,9	11,1	4,6	1,9	2,3	62,7
6	Центральный	31,3	78,3	68,2	164,6	24,7	85,8	48,3	90,3	43,8	165,3	68,9	28,9	34,2	932,6
7	Московская, Рязанская, Тверская, Тульская обл.	35,3	88,1	76,7	185,2	27,8	96,4	54,3	101,5	49,3	186,0	77,6	32,5	38,4	1049,2
8	Костромская, Ивановская, Владимирская, Ярославская обл.	16,2	40,4	35,2	84,9	12,8	44,2	24,9	46,5	22,6	85,3	35,6	14,9	17,6	481,1
9	Волго-Вятский	42,5	106,1	92,4	223,0	33,5	116,0	65,4	122,3	59,3	224,0	93,4	39,1	46,3	1263,3
10	Центрально- Черноземный	63,3	158,2	137,8	332,6	50,0	173,1	97,6	182,4	88,5	334,1	139,4	58,4	69,1	1884,4
11	Поволжский	91,5	228,5	199,0	480,6	72,2	250,1	141,0	263,5	127,9	482,7	201,3	84,4	99,8	2722,4
12	Астраханская обл., Калмыкия	6,8	16,9	14,7	35,5	5,3	18,5	10,4	19,5	9,4	35,7	14,9	6,2	7,4	201,2

13	Волгоградская обл.	31,3	78,1	68,0	164,3	24,7	85,5	48,2	90,1	43,7	165,0	68,8	28,8	34,1	930,7
14	Северный Кавказ	11,0	27,4	23,9	57,6	8,7	30,0	16,9	31,6	15,3	57,9	24,1	10,1	12,0	326,5
15	Краснодарский край	22,2	55,5	48,4	116,8	17,5	60,8	34,3	64,0	31,1	117,3	48,9	20,5	24,2	661,5
16	Ростовская обл.	24,4	85,9	74,8	180,7	27,2	94,0	53,0	99,1	48,1	181,5	75,7	31,7	37,5	1013,6
17	Ставропольский край	23,1	57,6	50,2	121,2	18,2	63,0	35,5	66,4	32,2	121,7	50,7	21,3	25,2	686,2
18	Урал	61,5	153,6	133,7	322,9	48,5	168,0	94,7	177,1	85,9	324,4	135,3	56,7	67,0	1829,3
19	Оренбургская обл.	34,7	86,7	75,5	182,4	27,4	94,9	53,5	100,0	48,5	183,2	76,4	32,0	37,9	1033,1
20	Пермская обл., Удмуртия	20,3	50,8	44,2	106,8	16,0	55,6	31,3	58,6	28,4	107,3	44,7	18,8	22,2	604,9
21	Свердловская обл.	8,7	21,7	18,9	45,6	6,8	23,7	13,4	25,0	12,1	45,8	19,1	8,0	9,5	258,3
22	Западная Сибирь	68,7	171,7	149,5	212,7	54,3	187,8	105,9	198,0	96,1	362,6	151,2	63,4	75,0	1896,8
23	Ханты-Мансийский округ	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	2,3
24	Алтайский край, респ. Алтай	40,6	101,4	88,3	361,4	32,0	110,9	62,5	116,9	56,7	214,1	89,3	37,4	44,3	1355,8
25	Восточная Сибирь, Бурятия, Читинская обл.	16,0	40,0	34,9	84,2	12,6	43,8	24,7	46,2	22,4	84,6	35,3	14,8	17,5	477,0
26	Красноярский край	14,5	36,1	31,4	75,9	11,4	39,5	22,3	41,6	20,2	76,3	31,8	13,3	15,8	430,1

№ п/п	Регион (область)	Площадь залежных земель (тыс. га), выведенных из использования													Всего
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
27	Хакасия	3,2	8,0	7,0	16,9	2,5	8,8	5,0	9,3	4,5	17,0	7,1	3,0	3,5	95,8
28	Иркутская обл., Усть- Ордынский округ	8,0	20,1	17,5	42,2	6,3	22,0	12,4	23,1	11,2	42,4	17,7	7,4	8,8	239,1
29	Дальний Восток, Якутия	0,7	1,7	1,5	3,5	0,5	1,8	1,0	1,9	0,9	3,6	1,5	0,6	0,7	20,0
30	Амурская обл., Еврейская авт. обл.	9,4	23,4	20,3	49,1	7,4	25,6	14,4	26,9	13,1	49,3	20,6	8,6	10,2	278,3
31	Приморский край	3,7	9,4	8,1	19,7	2,9	10,2	5,8	10,8	5,2	19,7	8,2	3,5	4,1	111,2
32	Хабаровский край	0,6	1,5	1,3	3,2	1,5	1,7	0,9	1,7	0,8	3,2	1,3	0,6	0,7	18,9
33	Сахалинская обл.	0,2	0,6	0,5	1,3	0,2	0,7	0,4	0,7	0,3	1,3	0,5	0,2	0,3	7,2
34	Магаданская обл.	0,2	0,4	0,4	0,9	0,1	0,5	0,3	0,5	0,2	0,9	0,4	0,2	0,2	5,1
35	Камчатская обл.	0,3	0,8	0,7	1,7	0,2	0,9	0,5	0,9	0,4	1,7	0,7	0,3	0,4	9,4
36	Корякский авт. округ	0,02	0,04	0,03	0,08	0,01	0,04	0,02	0,05	0,02	0,08	0,03	0,01	0,02	0,5
Всего		716,75	1815,2	1580,8	3816,7	574,3	1986,4	1119,5	2092,7	1015,0	3833,9	1598,7	630,8	792,4	21 612,45

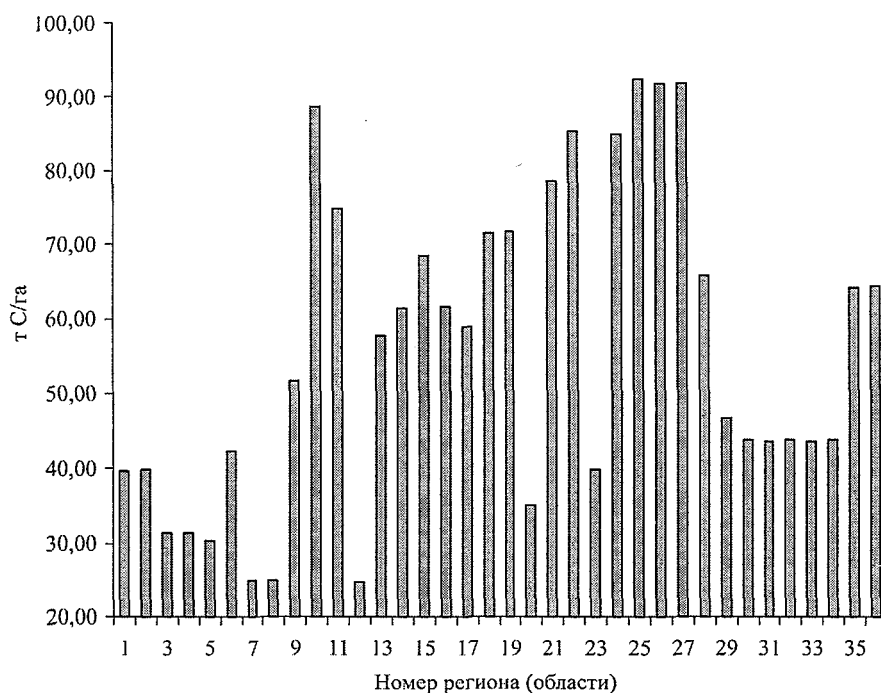


Рис. 1. Содержание органического углерода (т С/га) в среднем по регионам (областям) России (0—20 см).

Номер региона соответствует указанным в табл. 1.

личением доли черноземов в общей структуре их земельного фонда. Распределение глинистых почв совпадает с областью распространения черноземов. Песчаные почвы преобладают в северных районах.

Результаты расчетов показывают, что поступление углерода органических остатков в почвы луговых биоценозов также возрастает от северных регионов к центральным в диапазоне от 5,0 до 8,8 т С/га, что совпадает со сменой растительных зон от северной тайги к южной и смешанным лесам. Увеличение доли степной зоны в более южных регионах Европейской части страны приводит к уменьшению общей продуктивности лугов (до 4,8 т С/га в Ростовской области). В Сибири наибольшие значения годовой продукции рассчитаны для лугов в зоне смешанных лесов Алтая и Алтайского края, а также в Иркутской области (8,7 и 8,8 т С/га соответственно). Для горных районов и особенно территорий Дальнего Востока характерны высокопродуктивные травяные сообщества (Титлянова и др., 1988), которые, согласно полученным оценкам, являются источником 7,9 т С/га для горных лугов Северного Кавказа и 12,3—17,5 т С/га для почв Хабаровского, Приморского краев и Сахалина.

На рис. 2 представлен анализ обобщенных данных литературы по развитию естественной сукцессии на зарастающих землях (Нерсисян, Шур-Багдасарян, 1989; Снакин, 1992; Снытко и др., 1986; 1988; Турганаев, Пестерева, 1976), который свидетельствует о постепенном увеличении ежегодной продукции растительности в среднем через 20—25 лет после прекращения вспашки. Выявленная закономерность описывается степенной функцией, а рассчитанные величины составляют от 10 % полной продуктивности луговых биоценозов в первый год зарастания до 98 % на 25-й год, которые были использованы нами при моделировании динамики почвенного углерода на залежных землях. После 25 лет самозарастание ведет к формированию коренной растительности травяных или древесных сообществ. Поэтому для старовозрастных залежей оценка поступления углерода в почвы с растительными остатками должна проводиться раздельно по типам формирующихся лесных или травяных экосистем, что не входит в задачи настоящего исследования. Следует также отметить, что скорость развития сукцессии на небольших залежах, расположенных в опушечной зоне леса, может быть значительно выше, а сама сукцессия может заканчиваться за 3—5 лет (Кутузова и др., 2002). Однако такие земли, по-видимому, составляют незначительную долю залежей в стране и отдельно в нашей работе не рассматривались.

Полученные оценки ежегодной динамики почвенного углерода на территории всех залежных земель России за 1990—2002 гг. включительно приведены на рис. 3. Положительные значения свидетельствуют о потерях органического углерода и его эмиссии в атмосферу, а отрицательные — о стоке атмосферного углерода и аккумуляции в органическом веществе почв. Как следует из рис. 3, до 1998 г. в целом по территории страны зарастающие почвы теряли углерод. Однако в некоторых регионах, таких как Центральный, Дальневосточный, а также в ряде северных районов наблюдается аккумуляция углерода начиная уже с 2—4 лет зарастания, что связано со сравнительно высокой продуктивностью травяных биоценозов в

лесных зонах. Наиболее значительные потери почвенного углерода характерны для Ростовской

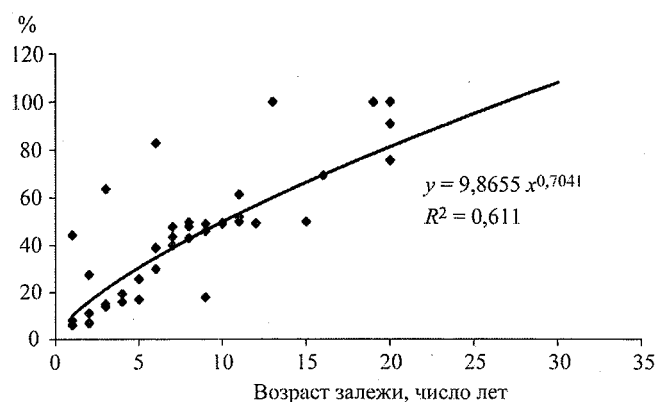


Рис. 2. Динамика продуктивности травяных сообществ залежных земель (в % от продуктивности луговых биоценозов).

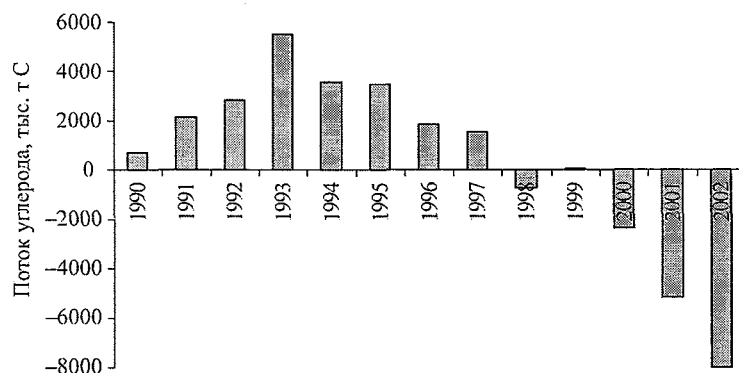


Рис. 3. Ежегодный поток углерода (тыс. т С) на территории залежных земель в России за период 1990—2002 гг.

области, Краснодарского и Ставропольского краев. Это объясняется теплым климатом этих регионов, который способствует быстрой минерализации органического вещества, а также малой продуктивностью луговых биоценозов в зоне сухих степей. С 1998 г. общее поглощение углерода залежными землями начинает преобладать над потерями в южных регионах, и баланс незначительно сдвигается в сторону нетто-аккумуляции углерода. Однако как следствие кризисной экономической ситуации в стране в 1998 г., в следующем 1999 г. нераспаханными остались значительные площади пашен (см. табл. 1), которые вновь сместили годовой баланс в сторону эмиссии углерода. С 2000 по 2002 г., в течение которых не происходило выведения из эксплуатации больших площадей сельскохозяйственных земель, наблюдается устойчивый рост стока атмосферного углерода на залежных землях России.

Таким образом, средняя ежегодная эмиссия углерода с территории залежных земель в течение 1990—1999 гг. составляет $2,1 \pm 1,8$ млн. т С/год (с разбросом значений в диапазоне от 5,5 до $-0,7$ млн. т С/год). Это значение отличается на порядок от значения 20 ± 200 млн. т, приведенного в работе Houghton (2003), и имеет значительно меньшую неопределенность. Вероятно, это может быть обусловлено тем, что оценки Houghton включают не только зарастание брошенных земель, но и другие виды изменения землепользования на всей территории бывшего Советского Союза. Кроме того, в нашей работе рассматривались только земли, выведенные из использования с 1990 г., в то время как Houghton не проводил подобного разделения. Тем не менее его оценки потерь углерода для 1990-х годов представляются несколько завышенными с учетом того, что в России и, вероятно, в остальных государствах СНГ сведение лесов с целью перевода этих земель в сельскохозяйственные в течение последнего десятилетия практически не проводилось, а площади залежных земель до 1990 г. были незначительными.

С 2000 по 2002 г. наблюдалось поглощение атмосферного углерода на залежных землях России (в среднем $-5,2 \pm 2,8$ млн. т С/год). По-видимому, за период 2000—2009 гг. среднее значение ежегодного стока углерода значительно увеличится.

Суммарное изменение содержания почвенного углерода в залежных землях различных областей России с 1990 по 2002 г. включительно показано на рис. 4. Как видно из этого рисунка, в целом за 13 лет для северных и центральных регионов Европейской части России, областей Западной Сибири и Дальнего Востока характерна нетто-аккумуляция углерода. При этом наибольшая скорость поглощения атмосферного углерода наблюдается в Московской, Рязанской, Тверской, Тульской, Костромской, Ивановской, Владимирской и Ярославской областях (до 3,9 т С/га в течение 1990—2002 гг.). На Дальнем Востоке аккумулировано до 6,6 т С/га. Однако наибольшие территории пашен были выведены из сельскохозяйственного использования в южных регионах, характеризующихся потерями углерода. Так, в Ставропольском крае эмиссии составили до 5,6 т С/га. Следовательно, общий баланс углерода на территории залежей Российской Федерации смещен в сторону эмиссии углерода и составляет 5,5 млн. т С (эмиссия 20,2 млн. т CO_2) с 1990 по 2002 г.

Наблюдаемая тенденция динамики почвенного углерода при развитии естественной сукцессии на брошенных пахотных землях свидетельствует о росте скорости его аккумуляции одновременно с увеличением возраста залежи. В связи с этим можно предположить, что после 2002 г. ежегодное поглощение атмосферного углерода на залежах будет возрастать и суммарный сток углерода значительно превысит его потери в течение 1990-х годов. Для количественной оценки этого предположения нами было выполнено прогнозное моделирование изменений до 2010 г., который входит в первый период действия определенных количественных обязательств в соответствии с Киотским протоколом (1997). Результаты расчетов представлены на рис. 5.

Сравнительный анализ данных на рис. 4 и 5 подтверждает рост аккумуляции атмосферного углерода почвами практически всех регионов к 2010 г. Центральные и южные области Европейской части России, Западной Сибири, а также юг Восточной Сибири и Дальнего Востока начинают интенсивно поглощать углерод, так что его аккумуляция на территории этих районов перекрывает величину потерь в течение 1990-х годов. Исключение составляют Ростовская область, Краснодарский край, Ставропольский край и Свердловская область. Однако несмотря на то что их зарастающие почвы все еще характеризуются потерями почвенного углерода в целом за период 1990—2010 гг., их абсолютная величина уменьшается. Так, территория Ростовской области теряет только 1,5 т С/га за 21 год против 3,4 т С/га в течение периода 1990—2002 гг. В почвах Ставропольского края, которые характеризуются максимальными суммарными потерями органического углерода, с 9—10-го года зарастания начинается его

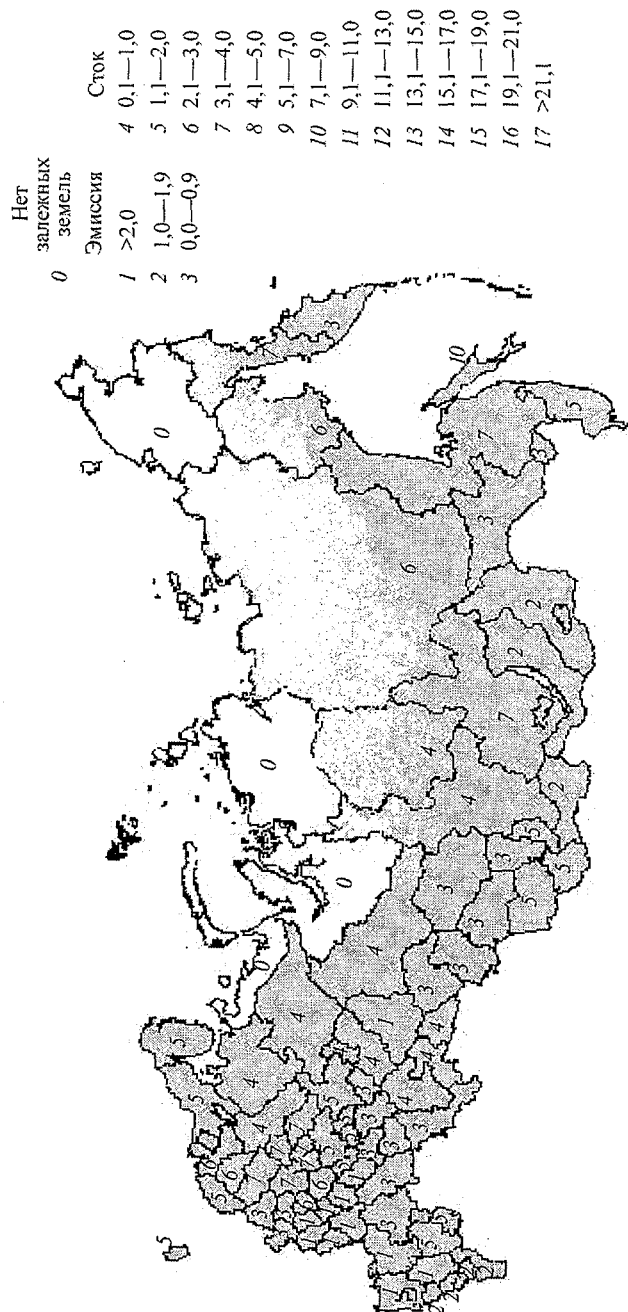


Рис. 4. Общее изменение органического углерода (г С/га) на залежных землях по областям России за период 1990—2002 гг.

0 — нет залежных земель; потери: 1 — более 2,0; 2 — от 1,0 до 1,9; 3 — от 0,0 до 0,9; аккумуляция: 4 — от 0,1 до 1,0; 5 — от 1,1 до 2,0; 6 — от 2,1 до 3,0; 7 — от 3,1 до 4,0; 8 — от 4,1 до 5,0; 9 — от 5,1 до 7,0; 10 — от 7,1 до 9,0; 11 — от 9,1 до 11,0; 12 — от 11,1 до 13,0; 13 — от 13,1 до 15,0; 14 — от 15,1 до 17,0; 15 — от 17,1 до 19,0; 16 — от 19,1 до 21,0; 17 — более 21,1.

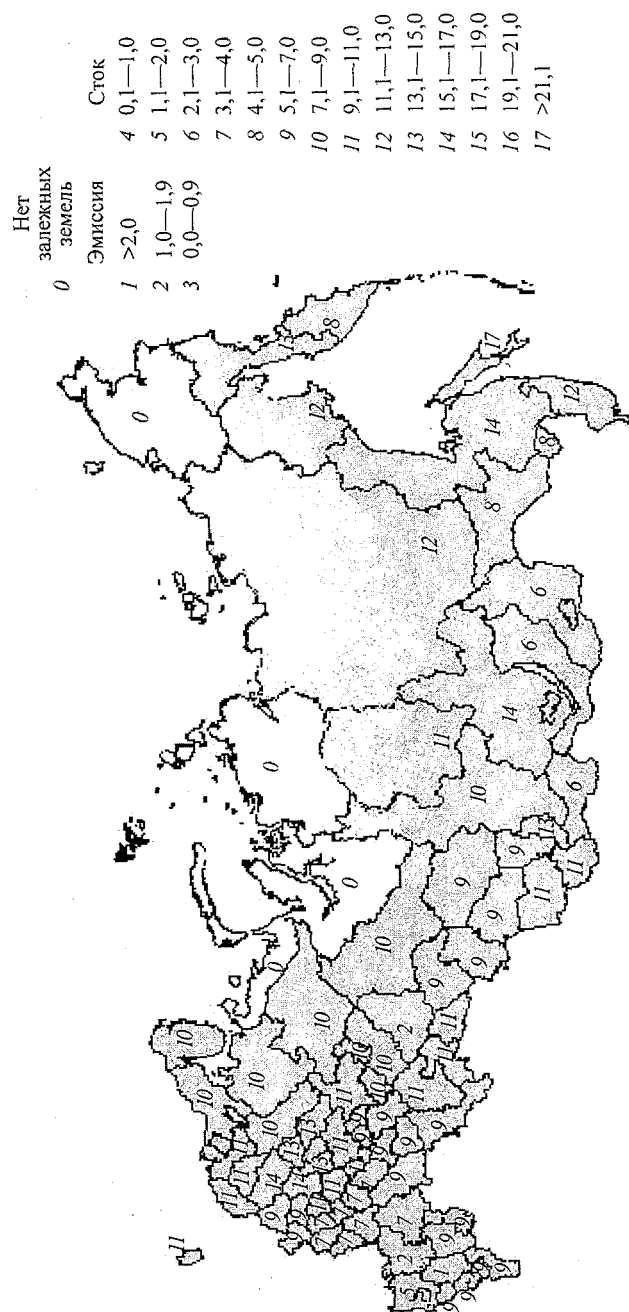


Рис. 5. Прогноз общего изменения содержания органического углерода (т С/га) на залежных землях по областям России за период 1990—2010 гг.

0 — нет залежных земель; *потери*: 1 — более 2,0; 2 — от 1,0 до 1,9; 3 — от 0,0 до 0,9; *аккумуляция*: 4 — от 0,1 до 1,0; 5 — от 1,1 до 2,0; 6 — от 2,1 до 3,0; 7 — от 3,1 до 4,0; 8 — от 4,1 до 5,0; 9 — от 5,1 до 7,0; 10 — от 7,1 до 9,0; 11 — от 9,1 до 11,0; 12 — от 11,1 до 13,0; 13 — от 13,1 до 15,0; 14 — от 15,1 до 17,0; 15 — от 17,1 до 19,0; 16 — от 19,1 до 21,0; 17 — более 21,1.

медленная аккумуляция, обусловленная сменой сукцессионных стадий и увеличением продуктивности растительности. Соответственно с 1990 по 2010 г. суммарные потери углерода на залежах Ставрополья сокращаются до 4,3 т С/га. Можно предположить, что после 2010 г. почвы этих регионов также постепенно сменят баланс органического углерода и выступят в качестве его стока. В целом, модельные расчеты показали, что с 1990 по 2010 г. зарастающие земли, выведенные из эксплуатации в течение 1990—2002 гг., могут аккумулировать около 153 млн. т атмосферного углерода, являясь соответственно стоком для 561 млн. т CO_2 .

Таким образом, при проведении ежегодной инвентаризации потоков парниковых газов в России необходимо учитывать динамику почвенного углерода на залежных землях, площади которых в течение последнего десятилетия значительно увеличились. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о том, что в ближайшие годы аккумуляция атмосферного углерода зарастающими почвами будет увеличиваться. Поэтому последовательное включение данных о потерях и поглощении углерода при прекращении эксплуатации пашен в национальную ежегодную инвентаризацию за период с 1990 по 2008—2012 гг. позволит более точно определить достигнутое в стране сокращение эмиссий парниковых газов и будет способствовать выполнению принятых Россией обязательств по РКИК и Киотскому протоколу.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 03-05-65085) и фонда ИНТАС (проект № YSF02-133).

Благодарность

Авторы выражают благодарность проф. Timo Karjalainen (Европейский институт леса, Финляндия) за консультации и помощь при проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевич Н. И. 1993. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. — М.: Наука. — 295 с.
- Болотина Н. И. 1976. Запасы гумуса и азота в основных типах почв СССР. — В кн.: Агрохимическая характеристика почв СССР. — М.: АН СССР. Т. 15, с. 187—202.
- Большой советский атлас мира. 1937. — М.: НИИ Большого советского атласа мира при ЦИК СССР. ГУГСК НКВД СССР. Т. 1, карты 122—123.
- Голубев И. Ф. 1970. Почвоведение с основами геоботаники. — М.: Колос. — 440 с.
- Гусев С. Д. 1932. Растительность залежей и циклы их восстановления по наблюдениям в Верхне-Уральском районе. — Надеждинск: Уральский краевед. — 12 с.
- Денисенко Е. А., Каргополова У. Д., Логофет Д. О. 1996. Первичная сукцессия растительности в техногенном ландшафте лесостепной зоны (марковская модель). — Известия АН РАН, Сер. биол., № 5, с. 542—551.

Киотский протокол к Конвенции об изменении климата. 1998. — UN—FCCC, UNEP / IUC. — 33 с.

Кононова М. М. 1984. Органическое вещество и плодородие почв. — Почвоведение, № 8, с. 6—20.

Кутузова А. А., Тебердиев Д. М., Раев А. П. 2002. Создание луговых сенокосов на неиспользуемых залежных землях. — Достижения науки и техники АПК, № 11, с. 16—18.

Левин Ф. И. 1977. Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции. — Агрохимия, № 8, с. 36—42.

Микляева И. М. 1996. Восстановление степной растительности на залежных землях Восточной Монголии. — Вестник Московского университета, сер. 5, № 1, с. 75—81.

Нерсисян Т. Ш., Шур-Багдасарян Э. Ф. 1989. Биологическая продуктивность природных фитоценозов. — Биол. журнал Армении, т. 42, № 7, с. 684—687.

Распределение земельного фонда с. х. угодий РСФСР по группам почв. 1980. — М.: Минсельхоз РСФСР, Россельхозхимия, Главное управление землепользования и землеустройства, ВНИ и проектно-технологический институт химизации с. х. — 107 с.

Романовская А. А., Гитарский М. Л., Карабань Р. Т., Назаров И. М. 2002. Оценка эмиссии закиси азота от не утилизируемой в аграрном секторе страны мортмассы сельскохозяйственных растений. — В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 18. — СПб.: Гидрометеиздат, с. 276—286.

Сельское хозяйство в России. 1995. Стат. сборник. — М.: Госкомстат России. — 503 с.

Сельское хозяйство в России. 2002. Стат. сборник. — М.: Госкомстат России. — 448 с.

Снакин В. В. 1992. Окислительно-восстановительный потенциал почв и продукционные характеристики травянистых экосистем. — Изв. Рос. АН, Сер. биол., № 2, с. 295—300.

Снытко В. А., Нефедьева Л. Г., Дубынина С. С. 1986. Травяные биогеоценозы Назаровской котловины и влияние техногенеза на их продуктивность. — В кн.: Продуктивность сенокосов и пастбищ / Отв. ред. А. А. Титлянова. — Новосибирск: СО Наука, с. 48—52.

Снытко В. А., Нефедьева Л. Г., Дубынина С. С. 1988. Тенденции восстановления нарушенных земель. — География и природные ресурсы, № 1, с. 56—61.

Соколов А. В., Розов Н. Н. 1976. Почвенно-агрохимическое зонирование территории СССР. — В кн.: Агрохимическая характеристика почв СССР. — М.: АН СССР. Т. 15, с. 5—16.

Справочник по климату СССР. 1965—1966. — Л.: Гидрометеиздат, ч. 2, вып. 1—34.

Титлянова А. А., Снытко В. А. и др. 1988. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. — Новосибирск: СО Наука. — 134 с.

Турганаев В. В., Пестерева Т. А. 1976. Динамика растительности на заброшенных пахотных угодьях южной части Вятско-Камского бассейна (Удмуртия). — Ботанический журнал, № 6, с. 1265—1272.

Chertov O. G., Komarov A. S. 1996. SOMM — a model of soil organic matter and nitrogen dynamics in terrestrial ecosystems. — In: Evaluation of Soil Organic Matter Models, Powlson, D. S., Smith, P., Smith, J. U., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. NATO ASI Series. Vol. 138, p. 231—236.

Coleman K., Jenkinson D. S. 1996. RothC-26.3 — A Model for the turnover of carbon in soil. — In: Evaluation of Soil Organic Matter Models, Powlson, D. S., Smith, P., Smith, J. U., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. NATO ASI Series. Vol. 138, p. 237—246.

Hong-Kong Observatory. 2003. 1961—1990 Global Climate Normals. National Climatic Data Centre of the United States. WMO.

available at http://www.hko.gov.hk/wxinfo/climat/world/eng/europe/russia/russia_e.htm

Houghton R. A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850—1990. — *Tellus*, vol. 51B, p. 298—313.

Houghton R. A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850—2000. — *Tellus*, vol. 55B, p. 378—390.

IPCC, 2000. Land use, land use change, and forestry. A special report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

Jenkinson D. S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. — *Philos. Trans. Roy. Soc.*, vol. B329, p. 361—368.

Masera O. M., Garza-Caligaris J. F., Kanninen M., Karjalainen T. et al. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. — *Ecological Modeling*, N 194, p. 177—199.

McGill W. B. 1996. Review and classification of ten Soil Organic Matter (SOM) Models. — In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Powlson D. S., Smith P., Smith J. U., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. NATO ASI Series. Vol. 138, p. 111—132.

Parton W. J. 1996. The CENTURY model. — In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Powlson D.S., Smith P., Smith J.U., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. NATO ASI Series. Vol. 138, p. 283—291.

Post W. M., King A. W., Wullschlegel S. D. 1996. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon. — In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Powlson D. S., Smith P., Smith J. U., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. NATO ASI Series. Vol. 138, p. 201—222.

Revised. 1996. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 1997. IPCC-OECD-IEA. Paris.

Thornthwaite C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. — *Geographical Rev.*, N 38, p. 55—94.

UN Framework Convention on Climate Change. 1998. UN-FCCC, UNEP/IUC. 29 p.

Van Veen J. A., Paul E. A. 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. Background information and computer simulation. — *Canadian J. Soil Sci.*, vol. 61, N 2, p. 185—201.

ПРОГНОЗ УРОЖАЯ КАК ЗАДАЧА ФИЗИКИ

О. Д. Сиротенко

Россия, 249030, Обнинск, пр. Ленина, д. 82, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии Росгидромета

Реферат. Задача расчета (прогноза) продуктивности агроэкосистемы сформулирована как задача математической физики. Конечный урожай определяется в результате решения задачи Коши для трех связанных между собой систем дифференциальных уравнений, описывающих рост и развитие растений, энерго- и массообмен в системе ПОЧВА—ПОСЕВ—АТМОСФЕРА, а также изменение содержания органического углерода в почве. Приводятся примеры решения указанных базовых систем уравнений. Анализируются прогностические возможности модели. Рассматриваются перспективы создания системы мониторинга урожайности для территории России на основании представленной теоретической разработки.

Ключевые слова. Прогноз, урожай, агроэкосистема, климат, энергообмен, массообмен, мониторинг, задача математической физики.

CROP YIELD PREDICTION AS AN ISSUE OF PHYSICS

O. D. Sirotenko

All-Russia Research Institute of Agricultural Meteorology, 82, Lenin str., 249039 Obninsk, Russia

Abstract. Calculating (predicting) of agroecosystem productivity is presented as an issue of mathematical physics. A crop yield is estimated through solving the Cauchy task for three interrelated systems of differential equations describing plant growth and development, energy and mass exchange within Soil—Crop—Atmosphere system, and changes of organic carbon content in soil. Examples of solution of these basic systems of equations are given. Prognostic capacity of the model is analyzed. The prospects for developing a crop monitoring system for the territory of Russia are considered using theoretical developments presented.

Keywords. Prediction, crop, yield, agroecosystem, climate, energy, mass, exchange, monitoring, mathematical physics.

Введение

Прогноз урожая — традиционная статистическая задача, первоначальная научная формулировка которой восходит, по-видимому, еще к XV в. (Шурыгин, 2000). Библиография по этой агрометеорологической, по су-

ществу, проблеме насчитывает многие сотни работ. В СССР были разработаны действующие до настоящего времени статистические методы прогноза урожаев для всех важнейших сельскохозяйственных культур и всех регионов страны (Руководство по агрометеорологическим прогнозам, 1984). Однако в последние годы развитие этих методов практически прекратилось, несмотря на комфортные условия для их разработки и применения, созданные современной вычислительной техникой. Трудности эмпирико-статистического подхода к прогнозированию урожая рассмотрены в нашей работе (Сиротенко, 1981).

Название настоящей работы возникло под влиянием известной книги А. С. Монины (Монин, 1969). Ее цель — анализ совокупности физико-биологических процессов, формирующих уровень продуктивности агроэкосистемы, для выявления возможностей повышения точности прогнозирования конечного состояния этой системы, определяющего размеры и качество урожая.

Задача расчета (прогноза) урожая в современной постановке сводится к решению краевой задачи математической физики, включающей:

- систему уравнений роста и развития растений;
- систему уравнений энергомассообмена ПОЧВА—ПОСЕВ—АТМОСФЕРА;
- систему уравнений, описывающую потоки органического вещества в почве и — вместе с ним — органического углерода и азота.

Математическая постановка такой задачи стала возможной благодаря работам М. И. Будыко, А. И. Будаговского, А. А. Ничипоровича, Ю. К. Росса, Е. П. Галямина, Х. Г. Тооминга, Р. А. Полуэктова и ряда других исследователей. За рубежом важнейшие результаты по данной проблеме принадлежат Монси и Саеки, де Виту, Пенману, Торнли.

Моделирование роста и развития растений

Динамика роста и развития растений моделируется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dW_s}{dt} &= P + \sum_{i=1}^3 K_d W_{di} - K_g W_s, \\ \frac{dW_{ni}}{dt} &= (1 - Y_d) Y_g K_g \alpha_i W_s, \\ \frac{dW_{di}}{dt} &= Y_d Y_g K_g \alpha_i W_i - K_d W_{di}.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь биомасса посева представлена в виде трех фракций: деградирующей структурной (W_d), не деградирующей структурной (W_n) и фондовой (W_s). Фондовая биомасса образуется при фотосинтезе (P) и за счет распада

деградирующей части биомассы. Из каждой единицы вещества фонда W_s образуется Y_g единиц структурной биомассы, при этом $1 - Y_g$ единиц потребляется на дыхание. Часть образовавшейся биомассы $Y_g K_g W_s$ поступает в W_d , а остальное количество — $(1 - Y_d)$ во фракцию W_n . Далее поток ассимилятов с помощью ростовых функций α_i разделяется между тремя компонентами для каждой фракции структурной биомассы. Это побеги ($i=1$), корни ($i=2$) и репродуктивные органы ($i=3$). Естественно, что $\alpha_i \geq 0$ и $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$.

Для наглядности приведем оценки параметров модели (1) для молодых растений кукурузы и ячменя (табл. 1), полученные в работе (Barnes, Hole, 1978).

Таблица 1

Оценки констант скорости роста (K_g), скорости деградации (K_d), эффективности роста (Y_g) и доли деградирующей биомассы (Y_d) для растений ячменя и кукурузы

Параметр	Кукуруза	Ячмень
$K_g \text{ сут}^{-1}$	1,98	1,89
$K_d \text{ сут}^{-1}$	0,30	0,41
Y_g	0,65	0,64
Y_d	0,56	0,71

Как следует из данных табл. 1, константы скорости синтеза структурной биомассы в среднем в 5 раз выше констант скорости деградации. Ясно, что это возможно лишь для молодых растений. Поэтому для описания процессов роста на протяжении всего жизненного цикла растений K_g и K_d представляются как функции биологического времени, в качестве которого используются суммы эффективных температур воздуха. Суммы эффективных температур определяют также значения ростовых функций α_i . Температура воздуха помимо этого оказывает прямое влияние на процессы роста и старения растений через K_g и K_d . Это воздействие в диапазоне обычных температур подчинено правилу Вант-Гоффа.

Фотосинтез P — ключевая величина в системе (1), поскольку через нее проходят основные пути воздействия условий внешней среды на продуктивность растительного сообщества. Эту зависимость можно представить в виде (Сиротенко, 1981)

$$P = \frac{\varepsilon_f \tau \Psi_T L}{2(r - r_c)} \left[C + \alpha I r - \sqrt{(\alpha I r - C)^2 + 4 r_c I \alpha C} \right], \quad (2)$$

где ε_f — коэффициент газообмена; τ — длина дня; Ψ_T — температурная зависимость; L — относительная площадь листьев; α — угол наклона све-

товой кривой; I — средняя интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) в посеве; C — концентрация CO_2 ; $r = r_{mes} + r_c + r_{st}$ — сопротивления потоку CO_2 мезофилла (r_{mes}), фотохимическое (r_c) и устьичное (r_{st}), зависящее главным образом от увлажнения почвы.

Согласно (2), первичная фотосинтетическая продуктивность посева определяется приходящей солнечной радиацией, условиями увлажнения, температурой и концентрацией CO_2 в посеве.

Моделирование энергомассообмена в системе ПОЧВА—РАСТЕНИЕ—АТМОСФЕРА

Для оценки влияния условий среды на фотосинтез, дыхание, рост и развитие растений необходима модель энергомассообмена системы ПОЧВА—РАСТЕНИЕ—АТМОСФЕРА. Впервые сопряженная задача теплообмена для атмосферы и почвы, как известно, была сформулирована в 1941 г. А. А. Дородницыным. Сопряженная задача тепло- и влагообмена для атмосферы и почвы с растительным покровом значительно сложнее. Основные трудности этой задачи — параметризация слоя растительности и отсутствие апробированной аналитической теории естественного испарения из почвы с просохшим слоем. Не вдаваясь в детали этих проблем (Бойко, Сиротенко, 1985), отметим, что существуют вполне работоспособные модели энергомассообмена системы ПОЧВА—РАСТЕНИЕ—АТМОСФЕРА различной степени сложности. Представим простую модель, разработанную нами с учетом специфики рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned}\frac{\chi \rho L (q_l - q)}{r_a + r_{st}} &= R_l - \frac{\rho C_p L (T_l - T)}{r_a}, \\ \frac{\chi \rho (q_s - q)}{r_a + r_{ss}} &= R_s - \frac{\rho C_p (T_s - T)}{r_a} - G, \\ \frac{\partial}{\partial t} (C_s T_s) &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \theta_s}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial (\Psi_s + z)}{\partial z} \right) + d.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь T , T_l и T_s — температура воздуха, листьев и почвы соответственно; q_l и q_s — насыщающая удельная влажность воздуха при T_l и T_s ; q — измеренная удельная влажность; R_l и R_s — радиационный баланс слоя растительности и почвы соответственно; G — поток тепла в почву; L — относительная площадь листьев; r_a , r_{ss} и r_{st} — сопротивление потоку водяного пара для посева, просохшего слоя почвы и устьиц соответственно; χ —

скрытая теплота парообразования; ρ и C_p — плотность и теплоемкость воздуха; C_s и λ_s — объемная теплоемкость и теплопроводность почвы; θ_s и Ψ_s — объемная влажность и потенциал почвенной влаги; k_s — коэффициент влагопроводности почвы; d — удельные затраты воды на транспирацию; t — время.

Система (3) представляет собой комбинированную модель энергомассообмена — квазистационарную для атмосферной среды и нестационарную для почвы. Численные методы решения подобных задач детально рассмотрены в книге (Бойко, 1993). Системы (1) и (3) взаимосвязаны. Для интегрирования (3) используются данные о динамике листовой поверхности $L(t)$ и массы корневой системы (в результате отслеживаются изменения вертикального профиля распределения корней). В свою очередь решение (3) обеспечивает необходимую для интегрирования (1) информацию о состоянии среды обитания растений. Основная и незаменимая функция (3) — расчет и прогнозирование влажности почвы. Именно эта функция в значительной степени определяет прогностические возможности данной численной схемы в целом. Влагозапасы почвы — важнейшая интегральная характеристика агрометеорологических условий. В степных районах величины весенних влагозапасов, как правило, значимо коррелируют с урожайностью зерновых культур.

Моделирование динамики органического вещества почвы

Моделирование динамики органического вещества почвы (ОВП) представляется совершенно необходимым для долгосрочного (до сева) прогнозирования урожайности. Нами разработана модель ОВП (Сиротенко, Романенков, Шевцова, 2003), которую для данной задачи представим в виде:

$$\begin{aligned}\frac{dH}{dt} &= h_R m_R R + h_F m_F F - m_H H, \\ \frac{dR}{dt} &= k_0 Y - m_R R, \\ \frac{dF}{dt} &= f_m - m_F F.\end{aligned}\tag{4}$$

Здесь H — запасы углерода в пахотном слое почвы; R и F — содержание углерода в растительных остатках и органических удобрениях, поступивших в почву; m_R , m_F и m_H — коэффициенты разложения растительных остатков, удобрений и гумуса соответственно; h_R и h_F — безразмерные коэффициенты гумификации соответствующих фракций ОВП; Y — биологический урожай сельскохозяйственных культур; k_0 — коэффициент, равный доле поступившего в почву биологического урожая; f_m — содержание углерода в органических удобрениях.

Основное назначение модели в рамках задачи прогнозирования урожая — расчет ежесуточных (ежедекадных) поступлений доступного для растений минерального азота за счет минерализации ОВП. Текущие поступления азота ΔN определяются по формуле

$$\Delta N = \alpha m_H H + \beta(1 - h_R)m_R R + \gamma(1 - h_F)m_F F, \quad (5)$$

где α , β и γ — коэффициенты, равные отношению содержания азота к содержанию углерода в каждой из фракций ОВП. Азот в доступной для растений форме (аммиак и нитраты) интенсивно перерабатывается микроорганизмами и/или вымывается и поэтому не может накапливаться в почве. В связи с этим азот чаще других элементов минерального питания оказывается в дефиците и является основной причиной уменьшения урожайности. Отметим, что, согласно (5), большие текущие запасы ОВП — необходимое, но недостаточное условие нормального снабжения растений азотом на всем протяжении вегетационного периода. При засухе коэффициенты разложения ОВП (m_R , m_F и m_H) уменьшаются практически до нуля и поступление азота блокируется. Зависимости коэффициентов разложения ОВП от температуры и влажности почвы в (4) представляются весьма важными. Отметим, что экспериментальные данные для идентификации параметров этих зависимостей имеются. Так, например, по данным (Wildung, Garland, Buschbom, 1975) найдена тесная (примерно 0,82) корреляция между скоростью эмиссии CO_2 и произведением температуры и влажности почвы.

Система (4) позволяет оценить текущее и ожидаемое эффективное плодородие почвы, которое определяется ее предисторией. Вопрос о необходимой продолжительности этого периода нуждается в отдельном исследовании. По нашим оценкам, его длина не должна быть меньше 3—5 лет.

Включение в прогностическую схему уравнений (4) не создает значительных трудностей, поскольку эта система, в отличие от (1) и особенно (3), может интегрироваться со значительно большим шагом по времени — декадным или даже месячным. Такой шаг принят во всех известных западных моделях плодородия почв, например CENTURY. Помимо этого, для расчета динамики ОВП на основании (4) требуется небольшой объем сельскохозяйственной информации — данные об урожайности и дозах внесенных удобрений по отдельным годам.

Примеры решения базовых систем уравнений в задаче прогноза урожайности

Итак, представлены три системы уравнений, совместное интегрирование которых с соответствующими начальными условиями обеспечивает решение проблемы расчета (прогноза) урожайности как задачи Коши. До

настоящего времени модели (1), (3) и (4) в рамках единой численной схемы для прогнозирования не использовались. Тем не менее каждая из этих трех моделей в отдельности изучены достаточно основательно.

Система (1) в упрощенном виде как динамическая модель ПОГОДА—УРОЖАЙ более 20 лет используется в составе имитационного комплекса для оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства на территории бывшего СССР. Эти результаты представлены во многих публикациях (Израэль, Сиротенко, 2003), и здесь нет необходимости на них останавливаться. Приведем пример использования модели ПОГОДА—УРОЖАЙ в квазипрогностическом режиме (табл. 2) (Сиротенко, Абашина, 1982).

Таблица 2

Прогнозируемая урожайность яровой пшеницы (ц/га) по данным агрометеорологической станции Ершов, Саратовская область
(Δ — средняя по модулю ошибка прогноза)

Год	Дата составления прогноза									
	Всходы	10 V	20 V	31 V	10 VI	20 VI	30 VI	10 VII	20 VII	Уборка
1972	4,6	4,6	3,7	3,1	1,9	1,2	0,8	0,5	—	0,5
1973	11,1	—	11,2	12,2	12,2	10,6	11,1	16,3	19,2	19,6
1974	14,3	14,5	13,2	13,0	13,9	14,6	22,3	21,6	21,1	21,1
1975	8,2	6,9	4,9	4,0	1,7	1,0	0,9	0,9	—	0,9
1976	4,3	5,9	5,2	4,8	4,3	7,0	7,3	8,6	10,4	10,9
1977	13,5	13,5	10,7	10,5	5,8	6,3	9,4	7,9	8,0	8,0
1978	16,1	—	16,5	16,8	16,9	15,7	17,0	20,3	21,5	23,2
1979	15,7	—	15,4	13,9	11,9	9,4	8,5	9,7	11,3	10,7
1980	14,4	—	14,2	13,1	12,7	11,7	11,6	8,1	7,4	7,2
1981	16,2	—	15,6	15,1	12,3	10,2	6,6	6,3	5,8	5,6
Δ	6,87	—	6,03	5,48	4,53	3,98	2,88	1,17	—	0

Для прогнозирования урожая яровой пшеницы до даты составления прогноза задавались фактические метеорологические данные, а далее до созревания яровой пшеницы использовалась климатическая информация. Материалы ежедекадных прогнозов за 10 лет, полученные на основании модели (см. табл. 2), представляют широкий спектр агрометеорологических условий формирования урожая, характерный для континентального климата. Здесь в динамике представлены и условия катастрофических засух 1972 и 1975 гг., и условия формирования рекордных урожаев 1973, 1974 гг. и особенно 1978 г. Данные табл. 2 позволяют оценить прогностическую значимость „предыстории посева”. Так, средняя (по модулю)

ошибка прогноза к 20 июня (дате составления официальных прогнозов) уменьшилась практически в 2 раза по сравнению с прогнозом на дату всходов. Начальные влагозапасы почвы как предиктор „срабатывают” не всегда. Например, в 1975 г. по начальным влагозапасам ожидался вдвое больший урожай, чем в 1976 г. Однако фактически в 1975 г. урожай полностью погиб, а в 1976 г. собран средний для данной зоны урожай. Величины Δ (см. табл. 2) позволяют в первом приближении оценить роль метеорологического прогноза. Так, при наличии точного прогноза на июнь средняя ошибка прогнозирования урожая уменьшилась бы более чем на 30 % (с 6 до 4 ц/га). Из данных табл. 2 следует, что и декадные прогнозы погоды могут заметно повысить точность прогнозирования урожайности.

Прогнозы урожайности по сценарию „климат”, конечно, могут быть улучшены и чисто статистическими методами. Так, в нашей работе (Сиротенко, Абашина, 1985) на материалах той же Саратовской области за 31 год показано, что коэффициент корреляции, составляющий 0,76, для прогноза урожая на 20 июня по сценарию „климат” повышается до 0,83 при прогнозе по аналогу текущего года, определенному на дату составления прогноза.

Рассмотрим теперь пример решения системы уравнений (3), описывающих процессы энергомассообмена системы ПОЧВА—РАСТЕНИЕ—АТМОСФЕРА. На рис. 1 показано изменение рассчитанных и фактических суточных значений суммарного испарения для посева ячменя, измеренных с помощью большого гидравлического испарителя (Валдай, 1973 г.). Модель достаточно адекватно воспроизводит весьма значительную межсуточную изменчивость суммарного испарения — важнейшего показателя для оперативной оценки влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Значимость этого показателя подтверждает тесная корреляция суммарного испарения и суточного фотосинтеза.

Модель энергомассообмена системы ПОЧВА—РАСТЕНИЕ—АТМОСФЕРА (3) помимо задачи прогноза (расчета) урожайности может автономно использоваться для мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур. Подобная система MORECS более 20 лет применяется метеослужбой Великобритании для оперативной ежесуточной оценки дефицита испарения и почвенной влаги для полей, садов и лугов в узлах регулярной сетки 40×40 км. Возможности предлагаемой модели (3) несколько шире: помимо оперативной оценки влагообеспеченности (по динамике испарения и влагозапасов почвы) она позволяет отслеживать и прогнозировать заморозки, суховеи, запал и захват зерна и другие опасные явления на основании анализа температуры слоя растительности (T_r) и поверхности почвы (T_{s0}). На рис. 1 б в качестве иллюстрации возможностей системы представлены результаты прогнозирования температуры поверхности почвы с полусуточной заблаговременностью. Минимальная температура поверхности почвы, как следует из этих данных, достаточно хорошо воспроизводится с помощью модели (3).

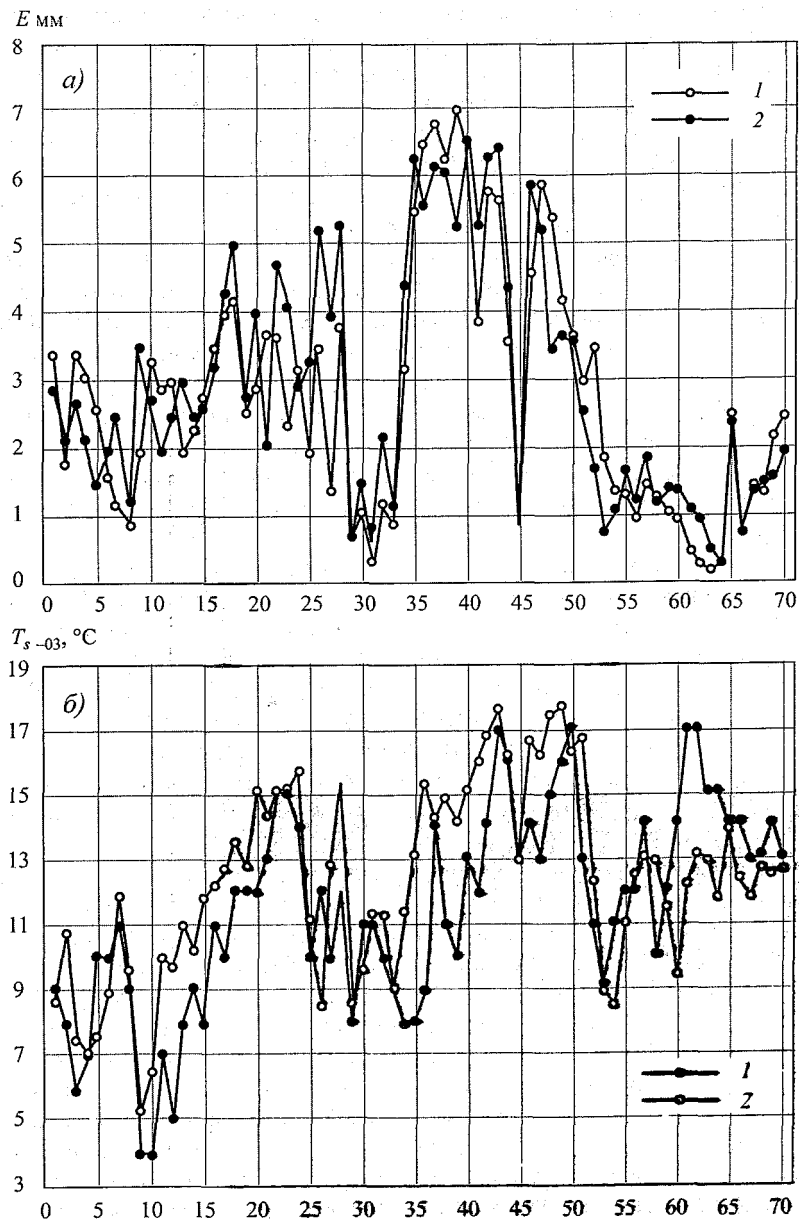


Рис. 1. Изменение фактических (1) и рассчитанных (2) значений суточного суммарного испарения (а) и температуры (б) поверхности почвы (посев ярового ячменя, 1973 г., Валдай).

Перейдем к представлению модели динамики органического вещества почвы (4). Эти модели в задачах прогнозирования урожайности, насколько нам известно, до сих пор не использовались. Модель (4) позволяет оценить эффективное плодородие почвы на дату составления прогноза по текущему содержанию гумуса (H), растительных остатков (R) и органических удобрений (F) в почве. Расчет ΔN на основании функций $H(t)$, $R(t)$ и $F(t)$ дает возможность аккумулировать для целей прогнозирования информацию о предыстории урожайности и органических удобрений в данном районе. Данные об урожайности за прошлые годы имеют, по-видимому, значительную прогностическую ценность. Действительно, ряд статистических схем для прогноза урожайности (например, Загайтов, Воробьева, 1998) базируется исключительно на данных об урожайности за прошлые годы. Можно предположить, что эффективное плодородие как предиктор особенно важен для малогумусных почв Нечерноземной зоны России, где велика межгодовая изменчивость этого показателя. На рис. 2 представлены результаты трех численных экспериментов, позволяющих оценить степень влияния погодных условий на динамику ОВП в пахотном слое дерново-подзолистей почвы (Московская область). Кривая 1 на этом рисунке соответствует реальным климатическим условиям за 1957—1965 гг. Кривая 3 получена при ежегодном повторении условий самого засушливого за этот период 1964 г., а кривая 2 — повторении условий самого влажного 1962 г. Траектории содержания ОВП, исходящие из одной точки (см. рис. 2), быстро расходятся благодаря различию гидрометеоро-

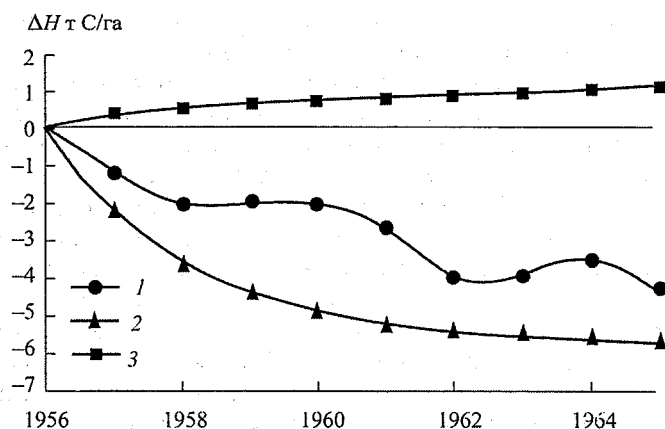


Рис. 2. Влияние контрастных климатических условий на изменение органического углерода (ΔH) в пахотном слое почвы.

1 — реальные климатические условия 1957—1965 гг.; 2 — последовательность влажных лет по типу 1962 г.; 3 — последовательность засушливых лет по типу 1964 г. (Московская область, опытное хозяйство „Снегири“).

логических условий. Уже через год разность запасов органического углерода в пахотном слое составила 3 т/га, а через 3—4 года достигла 5—6 т/га, что составляет около четверти исходных запасов органического углерода. Результаты этого численного эксперимента показывают, что серии как аномально засушливых, так и аномально увлажненных лет могут существенно изменить содержание органических веществ в пахотном слое дерново-подзолистых почв и тем самым обусловить долговременную тенденцию изменения продуктивности сельскохозяйственных культур.

Перспективы развития систем мониторинга урожайности

Представленная здесь теория продуктивности агроэкосистем может служить основой для создания новой эффективной государственной системы мониторинга урожайности на территории России. Ближайший аналог такого проекта — оперативная система мониторинга и прогнозирования урожайности Европейского Сообщества, основанная на использовании как наземной, так и спутниковой информации (Meyer-Roux, Vossen, 1994). Для успешной реализации такого проекта необходимо оперативное информационное обеспечение, нуждающееся в специальной разработке.

Первоочередное значение для проектируемой системы имеет учет изменчивости полей атмосферных осадков, определяющих пространственную изменчивость урожайности и, следовательно, разрешающую способность системы. Характерные радиусы корреляции суточных сумм осадков на Европейской территории России составляют 50—70 км. Недостаточная густота наземной сети измерения осадков приводит к поискам средств для дистанционного измерения осадков с более высоким пространственным разрешением. Наиболее достоверные данные получаются с помощью микроволновых измерений методами активной локации. Однако радиолокационные наблюдения пока не охватывают важные сельскохозяйственные районы страны. По этой причине, возможно, наиболее продуктивным будет подход с одновременным использованием данных наземной сети и спутниковых измерений радиационной температуры в инфракрасном (ИК) диапазоне с помощью геостационарных спутников: данные поступают регулярно каждые 30 минут и доступны в широком поясе от 60° ю. ш. до 60° с. ш. (Вельтищев, Жильцова, 1997; Zhiltsova, 1998). Согласно выводам этих авторов, методика численного анализа сумм осадков с пространственным разрешением порядка 20 × 20 км обеспечивает наибольшую точность в летние месяцы и в умеренных широтах. Это позволяет надеяться на успешное использование подобного подхода для кардинального повышения пространственного разрешения численных схем мониторинга состояния сельскохозяйственных культур.

В заключение представим некоторые технические характеристики разрабатываемой во ВНИИСХМ системы мониторинга сельскохозяй-

ственных культур. Первая очередь системы охватывает основные сельскохозяйственные районы ЕТ России. Работа системы строится на использовании суточной оперативной гидрометеорологической информации, временной шаг для основных моделей — также сутки. Предусматриваются два варианта схемы: для расчетов на фиксированной сети гидрометеорологических станций и в узлах регулярной сетки 50×50 км. Для мониторинга состояния посевов предлагается использовать следующие еженедельно обновляемые показатели:

- 1) сроки наступления основных фаз развития сельскохозяйственных культур,
- 2) карты изменения наземной биомассы и листового индекса посевов,
- 3) карты изменения суммарного испарения и влагозапасов почвы пахотного и метрового слоев,
- 4) карты прогнозируемой урожайности,
- 5) оценки опасных гидрометеорологических явлений.

Заморозки, засухи, переувлажнение почвы, запал и захват зерна и другие опасные явления диагностируются по динамике биомассы и площади листовой поверхности посевов, а также по приращению прогнозируемой урожайности за декаду или сутки.

Заключение

Задача расчета (прогноза) урожая сведена к задаче Коши для трех связанных между собой систем обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющих рост и развитие растений (1), энергомассообмен системы ПОЧВА—РАСТЕНИЕ—АТМОСФЕРА (3) и динамику органического вещества почвы (4). Исследование этой математической структуры численными методами позволяет получать оценки чувствительности урожая к многочисленным физическим и агротехническим переменным, задающим начальные и краевые условия данной задачи. Есть основания полагать, что таким образом будут найдены новые предикторы и построены эффективные физико-статистические схемы для прогнозирования урожая. Уже сейчас очевидно, что для повышения точности и заблаговременности прогнозов помимо агрометеорологических условий текущего сельскохозяйственного года необходимо учитывать условия формирования ОВП и, следовательно, фактическую урожайность и дозы удобрений за прошлые годы.

Результаты моделирования показывают, что весьма информативными для долгосрочного прогнозирования урожайности, в частности, могут оказаться показатели, характеризующие водно-тепловой режим почвы за прошлый год и особенно за осенний период, следующий после уборки урожая предыдущего года.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант 04-06-80105.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бойко А. П., Сиротенко О. Д. 1985. Моделирование энерго- и массообмена системы почва—растение—атмосфера при недостатке почвенной влаги. — Труды ВНИИСХМ, вып. 10. — Л.: Гидрометеиздат, с. 3—26.

Бойко А. П. 1993. Исследование гидрометеорологического режима среды обитания растений численными методами. — СПб.: Гидрометеиздат. — 215 с.

Вельтищев Н. Ф., Жильцова О. В. 1997. Анализ суточных сумм осадков с использованием данных метеостанций и инфракрасных измерений с геостационарных спутников. — Метеорология и гидрология, № 10, с. 12—21.

Загайтов И. Б., Воробьева Л. С. 1998. Прогноз колебаний природных условий сельскохозяйственного производства и всемирная статистика урожаев. — Воронеж. — 215 с.

Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д. 2003. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России. — Метеорология и гидрология, № 6, с. 5—17.

Монин А. С. 1969. Прогноз погоды как задача физики. — М.: Наука. — 184 с.

Руководство по агрометеорологическим прогнозам. 1984. Т. 1, Т. 2. — Л.: Гидрометеиздат.

Сиротенко О. Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. — Л.: Гидрометеиздат. — 168 с.

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. 1982. Об использовании динамических моделей для оценки агрометеорологических условий формирования урожаев. — Метеорология и гидрология, № 8, с. 95—101.

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В. 1985. О выборе сценариев метеорологических условий для прогнозирования по динамическим моделям погода — урожай. — Труды ВНИИСХМ, вып. 10. — Л.: Гидрометеиздат, с. 73—80.

Сиротенко О. Д., Романенков В. А., Шевцова Л. К. 2003. Имитационная система поддержки и обобщения результатов многолетних полевых опытов. — Агрохимия, № 10, с. 75—84.

Шурыгин А. М. 2000. Прикладная стохастика: робастность, оценивание, прогноз. — М.: Финансы и статистики. — 223 с.

Barnes A., Hole C. 1978. A theoretical basis of growth and maintenance respiration. — Ann. Bot., vol. 42, N 182, p. 1217—1221.

Meyer -Roux J., Vossen P. 1994. The first phase of the MARS project, 1988—1993: overview, methods and results. — In: Conf. on the Mars Project: Overview and Perspectives. Proceedings. Joint Res. Centre EC, p. 33—81.

Wildung R. E., Garland T. R., Buschbom R. L. 1975. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soil. — Soil Biol. Biochim, vol. 7, p. 373—378.

Zhiltsova O. V. 1998. Assimilation of infrared data from Meteosat to retrieve rainfall fields. — In: 9th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris, UNESCO, vol. 2, p. 403—404.

КЛИМАТОГЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ПРИРОСТА ЮВЕНИЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В МОДЕЛЬНЫХ ДРЕВОСТОЯХ В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

А. Е. Кухта, С. Н. Титкина

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН

Реферат. Оценена степень синхронности отклонений годичного линейного прироста ювенильных растений сосны обыкновенной от линии возрастного тренда в четырех различных модельных древостоях в Пензенской области, находящихся в различных условиях произрастания. Проведен анализ зависимости этих отклонений от аномалий температуры и количества осадков в текущем и предшествующем годах. Значимая корреляция обнаружена между отклонением прироста текущего года и количеством осадков за май—июль предыдущего года; значимой корреляции с температурой текущего и предыдущего вегетационных сезонов не обнаружено.

Ключевые слова. Древесные растения, линейный прирост, мониторинг, природная среда, изменения климата.

CLIMATE-CAUSED VARIATIONS OF THE ANNUAL APICAL INCREMENT IN JUVENILE SCOTCH PINE TREES IN MODEL STANDS LOCATED IN THE PENZA PROVINCE

A. E. Koukhla, S. N. Titkina

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia.

Abstract. A degree of similarity of deviations of annual apical increments in Scotch pine juvenile trees from the age trend is assessed for four different tree stands located in the Penza province. Dependencies of these deviations on the anomalies of monthly mean temperature and precipitation in current and previous years were analyzed. A significant correlation between current year deviation of the increment and previous May—June amount of precipitations has been found out. No significant correlations between current year deviation of the increment and temperatures of current and previous vegetative seasons have been found.

Keywords. Trees, linear increment, monitoring, change, environment, climate.

Введение

Для биологической оценки последствий изменений климатических факторов и влияния антропогенного стресса на экосистемы весьма перспективными объектами являются различные показатели продуктивности растений (Кухта и др., 2000; Andersson, 1988; Holten, Carey, 1992), в частности прирост деревьев (Kozłowski, Pallardy, 1997; Семенов, Кунина, Кухта, 1999).

Осуществляемая в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН программа исследований крупномасштабных изменений климата (Кухта, Семенов, 2002) ставит своей целью, в частности, выявление и анализ климатогенной составляющей межгодовых колебаний прироста древесных растений. Натурные наблюдения осуществляются в сосновых древостоях Европейской части России, находящихся в различных географических, климатических и почвенных условиях. Целью данной работы является сравнение характера отклонений годичного линейного прироста в высоту от возрастного тренда у подростка сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на четырех выделах, находящихся в различных экологических и климатических условиях (Кухта, Семенов, 2002). Это позволит приблизиться к пониманию роли локальных условий в формировании изучаемого показателя. Проводились также поиск и анализ зависимостей отклонений годичного прироста от возрастного тренда от аномалий среднемесячных значений температуры и количества осадков в текущем и предыдущем годах, что в дальнейшем может помочь определить влияние климатических условий на данный показатель. Вовлечение в анализ метеорологических показателей предшествующего года необходимо, поскольку для прироста текущего года важны размер и „качество” почки, заложенной в предыдущем году (роль этого фактора весьма велика — см. (Gavrikov, Karlin, 1993)), а также количество хвои прошлых лет, осуществляющей донорские функции по отношению к рассматриваемому побегу (Kozłowski, Pallardy, 1997).

Материалы и методы

В 2002—2003 гг. измерения годичного прироста в высоту у ювенильных растений сосны обыкновенной проводились в сосняках на территории Междуреченского лесничества Никольского лесхоза Пензенской области. Основу лесной интразональной растительности Пензенской области составляют сосновые сообщества (около 30 % лесной территории), приуроченные к древним речным террасам и выходам песков на склонах крупных оврагов. Большинство существующих сейчас в области сосняков — это искусственные насаждения, созданные человеком в разные годы на месте уничтоженных лесных сообществ или на бывших пахотных землях.

Выделы „Покровка-А” и „Усовка-А” расположены на бывших пахотных землях, а выделы „Покровка-Б” и „Усовка-Б” — в сложных сосняках. Первый ярус этих сосняков (30—40 м) представлен сосной обыкновенной, второй ярус включает низкорослые (до 15—18 м) лиственные деревья: дуб черешчатый, липу сердцевидную, клен остролистный, березу повислую. Для третьего яруса, помимо перечисленных деревьев, характерны также рябина обыкновенная и клен татарский. Реже встречаются черемуха обыкновенная и яблоня лесная. В числе кустарников отмечены лещина обыкновенная, бересклет бородавчатый, крушина ломкая, ракитник русский, роза майская, калина обыкновенная. Сомкнутость крон подлеска небольшая (0,2—0,4). В четвертом ярусе обычны кустарнички (костяника, черника, брусника, зимолубка зонтичная, ортилия однобокая), полукустарник (дрок красильный) и травы. В травяном покрове преобладают: злаки (вейник наземный, мятлик дубравный, полевица тонкая, перловник поникший и др.), осоки, папоротник-орляк обыкновенный, ожига волосистая и разнотравье (земляника лесная, ландыш майский, вероника лекарственная, кошачья лапка двудомная, ястребинка волосистая, фиалка опушенная, герань кроваво-красная и др.). Общее проективное покрытие трав составляет около 20—60 %. Пятый ярус включает зеленые мхи (покрытие 10—40 %): дикраниум, плевроциум и др. Структура почвы и накопление гумуса определяются не только особенностями рельефа и увлажнения, но и видовым составом сосняков. Для заложённых нами пробных площадей характерны оподзоленные, слабогумусные, каменистые супеси (Природа Пензенской области, 1970).

В сентябре 2002 г. и сентябре 2003 г. были заложены четыре выдела в разных по происхождению, положению и возрасту сосняках у деревень Покровка и Усовка (соответственно выделы „Покровка-А”, „Покровка-Б”, „Усовка-А”, „Усовка-Б”) на территории Междуреченского лесничества Никольского лесхоза Пензенской области. Выдел „Покровка-А” расположен в 119-м квартале на юго-западном склоне холма над рекой и представляет собой одновозрастные посадки 1993 г. на месте бывшей пашни. Выдел „Покровка-Б” расположен в 118-м квартале на том же юго-западном склоне холма и представляет собой спелый сосняк с естественным возобновлением под пологом. Выдел „Усовка-А” расположен в 140-м квартале на северо-восточном пологом склоне холма на месте пахотных земель, на которых находятся одновозрастные посадки 1993 г. Выдел „Усовка-Б” расположен в 140-м квартале на северо-восточном склоне холма в спелом сосняке с естественным возобновлением под пологом. Покровку и Усовку разделяет расстояние около 10 км. Выдел „Покровка-А” содержит 6 пробных площадей, выдел „Покровка-Б” — 10 пробных площадей, выдел „Усовка-А” — 10 пробных площадей, выдел „Усовка-Б” — 10 пробных площадей. На каждой пробной площади измерено по 5 деревьев, итого 180 деревьев.

Измерения проводились по методике, предложенной в работе (Кухта, Семенов, 2002; Кухта, 2003). Возрастной тренд представлялся в логарифмическом масштабе в виде квадратичной функции времени (Семенов, Кухта, 2003):

$$(\alpha t^2 + \beta t + \gamma).$$

Это полином минимальной степени, дающий правильный теоретический ход роста: сначала — нарастание годовых приростов, затем — кульминация, а потом — спад. Для каждого исследованного дерева параметры α , β и γ подбирались по ряду $\{\ln(P(t))\}$. Затем исследовались отклонения от возрастного тренда (у каждого дерева своего):

$$f(t) = \ln(P(t)) - (\alpha t^2 + \beta t + \gamma).$$

Далее вычислялись среднее значение $x(t)$ всех $f(t)$ и его ошибка $\delta(t)$. Именно $x(t)$ сопоставлялось с аномалиями (годовыми отклонениями многолетних средних) метеорологических переменных (Семенов, Кухта, 2003). Для измерений отбирались деревья не моложе 7 лет и не выше 4 м. На каждом дереве измерялись годовые сегменты ствола — начиная с верхнего (т. е. прирост в год измерения) и кончая последним (по направлению к комлю), который удавалось уверенно выделить. Известно, что годовые сегменты достаточно надежно выделяются по мутовкам за период времени иногда до 30 лет, считая от года измерений в сторону более ранних дат. Значения заносились в полевую ведомость в миллиметрах. Фиксировалась также высота растения. Результаты измерений были внесены в базу данных, которая ведется в ИГКЭ. Была выполнена их первичная статистическая обработка. Для анализа данные значения прироста переводились в логарифмический масштаб. Использование логарифмического масштаба позволяет совместно исследовать межгодовые колебания прироста как небольших деревьев, так и более крупных.

Для оценки взаимозависимостей межгодовых колебаний отклонений прироста от возрастного тренда на разных выделах (Кухта, Семенов, 2002), а также их зависимостей от аномалий метеорологических переменных вычислялись коэффициенты корреляции. Коэффициент корреляции между отклонениями прироста от возрастного тренда и аномалиями метеорологических переменных вычислялся с учетом ошибки оценки отклонения прироста по формуле

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - \delta_i^2)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}, \quad (1)$$

где R — коэффициент корреляции, $\{x_i\}$ — ряд средних отклонений прироста от возрастного тренда, $\{y_i\}$ — ряд значений климатических аномалий, $\{\delta_i\}$ — ряд значений ошибок оценки отклонения прироста от возрастного тренда, n — длина рядов. Коэффициенты корреляции вычислялись с использованием обычной формулы для различных пар исследуемых выделов для оценки сходства характера отклонений годичного прироста от возрастного тренда на различных выделах. Затем с использованием приведенной выше формулы вычислялись корреляции отклонений прироста на каждом выделе и аномалий температуры и осадков апреля и мая—июня (основной период роста побегов) текущего вегетационного сезона, а также апреля, мая—июня и августа предыдущего вегетационного сезона.

Массив метеорологических данных за 1989—2003 гг., включая ряды среднемесячных температур и осадков, был любезно предоставлен нам сотрудницей отдела мониторинга и вероятностного прогноза климата ИГКЭ Росгидромета и РАН канд. геогр. наук Э. Я. Раньковой (Ранькова, 2004).

Результаты и обсуждение

Оценка корреляции отклонений годичного прироста от возрастного тренда на четырех исследуемых выделах достоверно не показала наличия подобия между древостоями „Покровка-А” и „Покровка-Б”; „Усовка-А” и „Усовка-Б”; „Покровка-А” и „Усовка-Б”; „Покровка-А” и „Усовка-А”; „Покровка-Б” и „Усовка-А”. Значительное сходство обнаружено между отклонениями годичного прироста от возрастного тренда для древостоев „Покровка-Б” и „Усовка-Б”: коэффициент корреляции равен 0,86 (рис. 1).

По-видимому, столь значительный уровень корреляции для древостоев, расположенных далеко (на расстоянии 10 км) друг от друга, объясняется весьма сходными экологическими условиями данных выделов. Оба выдела заложены в сложных сосняках разнотравных с лиственным подростом.

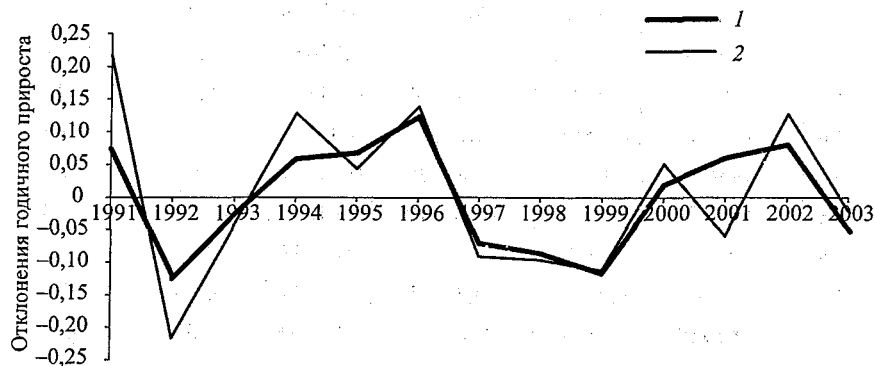


Рис. 1. Отклонения годичного прироста в высоту от линии возрастного тренда (логарифмы) для подростка на выделах „Усовка-Б” (1) и „Покровка-Б” (2).

том. Возобновление сосны здесь естественное, подрост находится под пологом леса. Почвы сходны и представляют собой оподзоленные, слабогумусные, каменистые супеси.

Высокая степень сходства характера отклонений годовичных приростов от возрастного тренда древостоев на выделах „Покровка-Б” и „Усовка-Б” позволили нам объединить эти два массива данных: $\{x'_i\}$ и $\{x''_i\}$ соответственно. При этом обобщенные отклонения для каждого года вычислялись как средневзвешенные значения, полученные для обоих выделов за тот же год, с весами, обратно пропорциональными квадратам ошибок (по Гауссу) (табл. 1):

$$x_i = (x'_i / \delta_i'^2 + x''_i / \delta_i''^2) / (1/\delta_i'^2 + 1/\delta_i''^2). \quad (2)$$

Ошибка обобщенной оценки вычислялась соответственно:

$$\delta_i = 1 / (1/\delta_i'^2 + 1/\delta_i''^2)^{1/2}. \quad (3)$$

Таблица 1

Отклонения годовичных приростов от возрастного тренда древостоев на выделах „Покровка-Б” и „Усовка-Б”, ошибки их оценок, а также обобщенные отклонения на изучаемых выделах и ошибки их оценок

Год	Выдел „Покровка-Б”, $\{x'_i\}$		Выдел „Усовка-Б”, $\{x''_i\}$		Обобщенные отклонения годовичных приростов, $\{x_i\}$	Ошибка оценки обобщенных отклонений, $\{\delta_i\}$
	Отклонения годовичных приростов	Ошибка $\{x'_i\}$	Отклонения годовичных приростов	Ошибка $\{x''_i\}$		
1991	0,22342	0,06448	0,0712	0,07176	0,16	0,05
1992	-0,21625	0,06143	-0,1249	0,05524	-0,17	0,04
1993	-0,04328	0,06077	-0,02623	0,05156	-0,03	0,04
1994	0,12918	0,05886	0,05911	0,04483	0,08	0,04
1995	0,04374	0,05759	0,06774	0,04327	0,06	0,03
1996	0,13902	0,05583	0,12311	0,04059	0,13	0,03
1997	-0,09107	0,05583	-0,07028	0,04059	-0,08	0,03
1998	-0,09572	0,05583	-0,08589	0,04059	-0,09	0,03
1999	-0,11176	0,05583	-0,11691	0,04059	-0,12	0,03
2000	0,05094	0,05583	0,01895	0,04059	0,03	0,03
2001	-0,05969	0,05583	0,05993	0,04059	0,02	0,03
2002	0,12776	0,05583	0,08037	0,04059	0,10	0,03
2003	-0,02085	0,05583	-0,05091	0,04059	-0,04	0,03

Дальнейший анализ взаимосвязи отклонений прироста и аномалий метеорологических переменных проводился с использованием такого ряда обобщенных отклонений. Значение коэффициента корреляции, вычисленного по обычной формуле, для отклонений прироста и суммы осадков мая и июня предыдущего года оказалось равным 0,5. Это значимая корреляция на уровне 90 % (расчет и оценка значимости выполнены с помощью процедур программы EXCEL). Оценка корреляции для ряда обобщенных отклонений, вычисленных по формуле (2), дала следующий результат: $R = 0,6$. Таким образом, корреляция достаточно высока. Корреляционная связь хорошо просматривается на рис. 2. С остальными среднемесячными метеорологическими переменными (температурами и осадками) за вегетационный сезон значимых корреляций не выявлено.

В биологической литературе отмечалась тесная взаимосвязь между ростом побегов, корней, а также продукцией и фотосинтезом деревьев и количеством доступной влаги (Елагин, 1994; Кухта, Семенов, Рудкова, в печати; Пугачев, 1972; Цельникер и др., 2002; Шулман, 1958; Glock, 1950; Fritts, 1966). При этом указано, что 80 % вариаций роста диаметров стволов деревьев может быть отнесено за счет колебаний количества осадков (Kozłowski, Pallardy, 1997). Подобная зависимость наблюдается и на на-

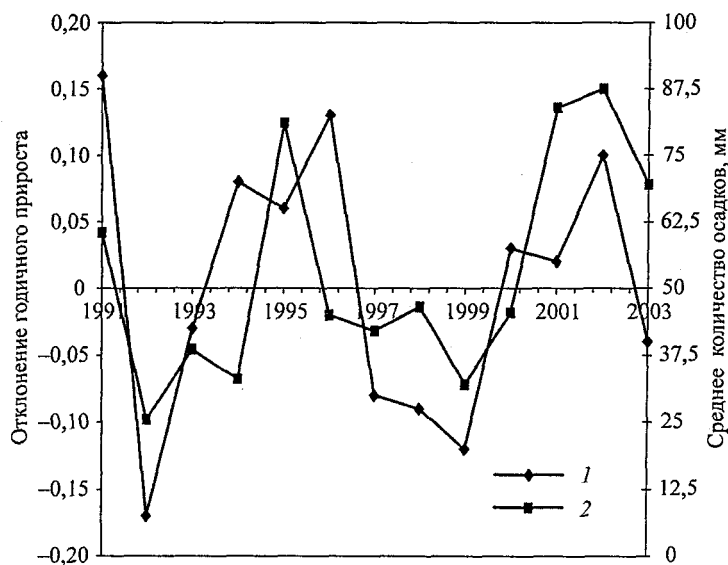


Рис. 2. Отклонения годичного прироста в высоту от линии возрастного тренда (логарифмы) и аномалии количества осадков мая—июня предыдущего года.

1 — обобщенное значение отклонения прироста на выделах „Усовка-Б” и „Покровка-Б”, 2 — аномалии осадков.

шем материале. Определяющее значение климатических условий, в том числе влагообеспеченности, предыдущего вегетационного сезона для роста побегов текущего года неоднократно отмечалось в литературе (Кухта, Семенов, Рудкова, в печати; Цельникер и др., 2002; Kozłowski, Pallardy, 1997). Так, в ряде работ указано, что величина прироста сосны в высоту преимущественно определяется условиями ассимиляции прошлого года, создавшими запасы резервных веществ (Елагин, 1969; Елагин, 1994; Качановский, 1991), что, в свою очередь, определяется влагообеспеченностью растений (Елагин, 1976; Крамер, Козловский, 1983; Gavrikov, Karlin, 1993).

Заключение

На основании исследований, проведенных в 2002—2003 гг. в сосняках на территории Междуреченского лесничества Никольского лесхоза Пензенской области, осуществлено сравнение характера отклонений годичного прироста в высоту от возрастного тренда подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на выделах, находящихся в различных экологических условиях. Обнаружено, что сходный характер колебаний приростов присущ древостоям на выделах „Покровка-Б” и „Усовка-Б”, заложенных в экологически однотипных сосновых древостоях (сложных разнотравных с листовым подростом, с естественным возобновлением сосны под пологом) на одинаковых почвах (оподзоленные, слабогумусные, каменистые супеси). Очевидно, экологические, в том числе эдафические, условия в значительной степени определяют отклик деревьев на воздействие климатических факторов. Таким образом, идентичные условия произрастания обуславливают относительно одинаковые характеристики колебаний прироста деревьев.

Для осредненной кривой отклонений прироста на выделах „Покровка-Б” и „Усовка-Б” осуществлен поиск и анализ зависимостей их межгодовых колебаний от аномалий среднемесячных значений температуры и количества осадков в текущем и предыдущем вегетационных сезонах. Корреляционный анализ не выявил существенной связи отклонений прироста с температурными аномалиями, а также с аномалиями количества осадков текущего и предыдущего годов. Значимая корреляция обнаружена для осадков мая—июня предыдущего года.

Благодарность

Авторы благодарны С. М. Семенову за помощь в анализе материала, Ю. Л. Цельникер за доброжелательный интерес к работе и научную консультацию, а также Э. Я. Раньковой за предоставленные данные и консультацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Елагин И. Н. 1994. Времена года в лесах России. — Новосибирск: Наука. — 271 с.
- Елагин И. Н. 1969. Сезонное развитие сосняков Европейской части СССР и Сибири. — Фенология, вып. 1(3), с. 7—9.
- Елагин И. Н. 1976. Сезонное развитие сосновых лесов. — Новосибирск: Наука. — 227 с.
- Качановский И. М. 1991. Эколого-биологические особенности роста и продуктивности сосновых фитоценозов Березинского биосферного заповедника. — Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. биол. наук. — Минск, с. 18.
- Крамер П. Д., Козловский Т. Т. 1983. Физиология древесных растений. Пер. с англ. — М.: Лесн. пром-ть. — 464 с.
- Куперман Ф. М. 1977. Морфофизиология растений. — Москва: Высшая школа. — 288 с.
- Кухта А. Е. 2003. Линейный прирост деревьев как индикатор состояния среды. — Сибирский экол. журн., № 6, с. 767—771.
- Кухта А. Е., Семенов С. М. 2002. Метод мониторинга линейного прироста ювенильных древесных растений и его роль в оценке крупномасштабных изменений состояния природной среды и климата. — В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — СПб.: Гидрометеониздат, т. XVIII, с. 167—192.
- Кухта А. Е., Семенов С. М., Рудкова А. А. Влияние температуры, осадков и количества солнечных дней на годичный прирост в высоту ювенильных растений сосны обыкновенной. — Труды Волжско-Камского государственного природного заповедника, вып. 5. В печати.
- Кухта А. Е., Ясюкевич В. В., Кухта Б. А., Рудкова А. А., Эскин В. И. 2000. Воздействие атмосферного загрязнения на растительность на территории Европы. — Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 1999 г. — М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, с. 42—45.
- Полевой В. В. 1989. Физиология растений. — М.: Высшая школа. — 464 с.
- Природа Пензенской области. 1970 / Под ред. проф. Жданова. — Приволжское книжное издательство, Пензенское отделение. — 228 с.
- Пугачев П. Г. 1972. Влияние климатических факторов на динамику годичного прироста лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dylis) в степном Зауралье. — Изв. высш. учеб. заведений. Лесн. журнал, № 3, с. 25—29.
- Ранькова Э. Я. 2004. Устное сообщение.
- Семенов С. М., Кунина И. М., Кухта Б. А. 1999. Тропосферный озон и рост растений в Европе. — М.: Изд. центр „Метеорология и гидрология”. — 208 с.
- Синнот Э. 1963. Морфогенез растений. — М.: Изд-во иностр. лит. — 603 с.
- Цельникер Ю. Л., Малкина И. С., Завельская Н. А. 2002. Географические аспекты фотосинтеза у лесных деревьев России. — В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — СПб.: Гидрометеониздат, т. XVIII, с. 81—109.
- Шулман Э. 1958. Годичные кольца у деревьев как свидетельство изменений климата. — В кн.: Изменение климата. — М.: Изд-во иностр. лит., с. 234—244.
- Andersson B. 1988. Defoliation of coniferous trees. Assessments 1984—1987 // The National Swedish Environmental Protection Board. Environmental Quality Laboratory. Uppsala — 28 p.
- Climate Change 1995. 1996a. The science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Houghton J. T. et al., ed.). Cambridge University Press. 572 p.
- Climate Change 1995. 1996b. Impacts, adaptations and mitigation of climate change. Scientific and Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment

Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Watson, et al., ed.). Cambridge University Press. 879 p.

Climate Change 2001. 2001a. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Houghton J. T. et al., ed.). Cambridge University Press, Wrong year for SAR WG2. 881 p.

Climate Change 2001. 2001b. Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (McCarthy J. J. et al., ed.). Cambridge University Press. 1032 p.

Fritts H. C. 1956. Radial growth of beech and soil moisture in a central Ohio forest during the growing season of 1952. — *Ohio J. Sci.*, v. 56, p. 17—28.

Gavrikov V. L., Karlin I. V. 1993. A dynamic model of tree terminal growth. — *Can. J. For. Res.*, v. 23, p. 326—329.

Glock W. S. 1950. Tree growth and rainfall — a study of correlation and methods. — *Wash. Smithsonian Misc. Coll.*, v. 111, N 18. — 47 p.

Holten J. I., Carey P. D. 1992. Responses of climate change on natural terrestrial ecosystems in Norway. *Norsk Institutt for Naturforskning*. — 59 p.

Kozlowski T. T., Pallardy S. G. 1997. Growth controle in woody plants. *Academic Press*. — 644 p.

МАССОВЫЕ МИГРАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРАНСМИССИВНЫХ ПАРАЗИТАРНЫХ БОЛЕЗНЕЙ

А. М. Баранова

Россия, ГСП-2, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 20, Институт медицинской паразитологии и тропической медицины им. Е. И. Марциновского Московской медицинской академии имени И. М. Сеченова, baralla@mail.ru

Реферат. Исторически массовые перемещения населения способствовали распространению инфекционных болезней. Миграции зараженных людей из местностей, где малярия была эндемичной, на территории, где болезнь была ликвидирована, приводили к восстановлению местной передачи через комаров рода *Anopheles*. Эпидемиологическое значение отдельных видов комаров определяется восприимчивостью к заражению разными видами возбудителей малярии рода *Plasmodium*, степенью связи с человеком (антропофилия), численностью вида и индивидуальной продолжительностью жизни комаров. Осуществление проектов преобразования природной среды человеком может оказывать непосредственное воздействие не только на состояние здоровья населения, но и на распространение трансмиссивных болезней на отдельных территориях, в частности малярии. Риск увеличения потенциальной передачи малярии должен быть определен до начала осуществления проекта. Восстановление передачи малярии на ранее свободных от нее территориях возможно только за счет массового завоза возбудителя больными или паразитоносителями. В настоящее время основным фактором распространения малярии в России является массовая миграция населения из эндемичных стран СНГ.

Ключевые слова. Миграции населения, комары *Anopheles*, изменения среды, мониторинг, профилактика малярии.

THE MASS PEOPLE MIGRATION AS A BASIC FACTOR TO THE SPREAD OF PARASITIC TRANSMISSION DISEASES

A. M. Baranova

Martsinovsky Institute of Medical Parasitology and Tropical Medicine of Sechenov Moscow Medical Academy, 20, Malaya Pirogovskaya, Moscow, GSP-2, Russia, baralla@mail.ru

Abstract. Historically, the mass population movement has contributed to the spread of infection diseases. Migrations of infected people from areas, where malaria is still endemic, to the areas, where the disease had been eradicated led to resurgence of local transmission by *Anopheles* mosquitoes. Epidemiological

significance of *Anopheles* mosquitoes is determined by the susceptibility of the species to different human malaria parasites, the degree of anthropophily, as well as by the density and longevity of vectors. The implementation of various nature transformation projects may have not only a direct effect on the health status of human population, but also on the spread of vector-borne diseases, in particular, malaria. A risk of the increase in malaria transmission should be analysed thoroughly prior to the implementation of such projects. The re-establishment of malaria transmission in previously malaria-free territories is possible only after the mass importation of malaria parasites by persons with malaria symptoms or in asymptomatic carriers. The mass people migration from endemic CIS countries is the basic factor to the spread of malaria in Russia.

Keywords. People migrations, *Anopheles* mosquitoes, environmental change, situation monitoring, malaria prophylaxis.

Введение

Появление и распространение малярии на маляриогенных территориях возможно только после завоза возбудителей рода *Plasmodium* больными или паразитоносителями, а также вследствие заноса зараженных комаров транспортными средствами или их залета из пограничных эндемичных территорий. Исторически все известные изменения в распространении инфекционных болезней были связаны с социальными факторами. Перемещения зараженных людей из гиперэндемичных стран Азии, Африки и Латинской Америки на неэндемичные территории в северном полушарии приводили к появлению эпидемических вспышек и укоренению инфекций на ранее свободных территориях. Массовый туризм в жаркие страны в XX в. обусловил завоз трансмиссивных болезней в США, Канаду, страны Западной и Восточной Европы. Кроме того, интенсивные миграции населения способствовали распространению устойчивости возбудителей инфекционных болезней к лекарственным препаратам (Rajagopalan et al., 1986).

Наибольшую роль сыграли межконтинентальные авиаперевозки пассажиров и грузов (Cimerman et al., 1997), миграции населения из слаборазвитых стран в поисках заработка вследствие демографического роста и урбанизации (переселение жителей сельских районов в города). Не меньшее значение имела интенсификация хозяйственной деятельности человека: вырубка леса, обводнение территорий под посевы сельскохозяйственных культур, рыбоводство и т. д. Антропогенные трансформации, в частности обводнение территорий создали более благополучные условия для обитания переносчиков инфекционных болезней.

Большинство эпидемических подъемов заболеваемости малярией были связаны, в первую очередь, с социальными факторами. Так, причиной резкого повышения заболеваемости малярией на севере России (до

64° с. ш.) в 30-х годах XX в. было массовое переселение туда репрессированных жителей Украины, Поволжья и Кубани, среди которых доля зараженных малярией лиц достигала 30 %. Эпидемия малярии в Турции в 70-х годах была обусловлена строительством ирригационных сооружений и обводнением 20 млн. га в Юго-Восточной Анатолии (Onogü, Grab, 1980), резкий рост малярии в Таджикистане в 90-х годах был связан с гражданской войной, разрухой и многочисленными беженцами из Афганистана (Алиев, 2000).

Роль различных факторов в возникновении эпидемической ситуации следует рассматривать для конкретных условий каждой страны, расположенной в определенной климатической зоне. Для стран умеренного пояса, к которым относится Россия, важна комплексная оценка условий, влияющих на эндемичный потенциал территории, или на „восприимчивость”, а также на подверженность притоку источников инфекции, или на „уязвимость” (терминология Всемирной организации здравоохранения). Распространение малярии зависит от следующих факторов:

1) природно-климатических условий (это наводнения, потепление климата, ландшафт местности, наличие анофелогенных водоемов — мест выплода малярийных комаров);

2) особенностей местных переносчиков малярии (это восприимчивость комаров *Anopheles* к возбудителям, их эпидемическая эффективность — „vectorial capacity” и чувствительность к применяемым инсектицидам);

3) массовой миграции граждан России в тропики и жителей эндемичных стран ближнего и дальнего зарубежья в Россию;

4) развития хозяйственной деятельности населения (это посев риса, овощеводство, рыбоводство, строительство дорог, ирригационных сооружений и др.);

5) социального и культурного уровня населения (это своевременное обращение за медицинской помощью, применение средств защиты от укусов насекомых).

В данной статье представлена оценка значимости каждой группы факторов в настоящее время для определения ведущих, что необходимо для разработки комплекса профилактических мер, препятствующих завозу и распространению малярии в России.

Природно-климатические условия, определяющие маляриогенность территории

В этой группе факторов наибольший интерес представляет потепление климата, активно обсуждаемое в последние годы (Martens et al., 1999). В ряде публикаций приводятся данные о более высокой заболеваемости трансмиссивными болезнями в годы с необычно высокими температура-

ми в сезоне передачи инфекции. Однако такое совпадение не является постоянным. Имеются и другие наблюдения, когда в годы с повышенной температурой никаких эпидемий не было. Теоретически потепление климата может повлиять на ситуацию по малярии следующим образом:

- расширение ареалов переносчиков малярии, проникновение южных более эффективных видов комаров на север;

- появление благоприятных условий для местной передачи в псевдоочагах малярии на высоте более 1500 м над уровнем моря;

- увеличение длительности сезона эффективной заражаемости малярийных комаров и числа оборотов инфекции в сезоне передачи малярии;

- возникновение местной передачи возбудителей тропической малярии, для развития которых в переносчике необходимы более высокие среднесуточные температуры воздуха.

В ходе исследования маляриогенности десяти районов юга России в 90-х годах (Сергиев и др., 2000) было установлено, что высокий риск возобновления передачи малярии существует только на территории Дагестана, где произошли две локальные вспышки трехдневной малярии в двух населенных пунктах: в селе Новые Викри в 1981-82 г. (103 больных) и в городе Избербаше в 1996-97 г. (23 больных).

В отличие от России, для азиатских и закавказских стран СНГ потепление климата означает расширение ареалов эффективных переносчиков (особенно *An. sacharovi*, *An. superpictus*), увеличение доли случаев тропической малярии в Таджикистане, появление местной передачи малярии в населенных пунктах Горного Бадахшана и в предгорных районах Большого и Малого Кавказа. Ниже приведена краткая характеристика маляриологической ситуации в трех странах Закавказья и четырех странах Центральной Азии, откуда происходит постоянный завоз трехдневной малярии в Россию. Эти страны расположены у северной границы мирового ареала возбудителя трехдневной малярии *P. vivax*, где маляриогенный потенциал низменных территорий высокий и местная передача малярии происходит ежегодно.

Азербайджан. Эпидемия малярии началась в середине 90-х годов в районах Кура-Араксинской и Ленкоранской низменностей. В 1997—2000 гг. заболеваемость малярией постепенно снизилась с 9911 до 1526 случаев. Улучшение ситуации по малярии стало результатом проведения дезинсекционных обработок жилых и хозяйственных помещений в наиболее пораженных малярией населенных пунктах. В качестве ларвифагов в поселковых анофелогенных водоемах использовали рыбку гамбузию (*Gambusia affinis*), для разведения которой в четырех районах Республики были организованы питомники. В 2000 г. в эндемичных районах было начато насаждение эвкалиптов с целью осушения заболоченных территорий. Следует отметить, что ежегодно 300—500 завозных из Азербайджана случаев трехдневной малярии выявляют в России, Украине, Беларуси.

Армения. Эпидемия малярии в пограничных районах Азербайджана, занятых Арменией в результате войны в Нагорном Карабахе, привела к заражению военнослужащих, которые после демобилизации завезли инфекцию в районы Араратской долины с высоким маляриогенным потенциалом. В 1998 г. число случаев малярии достигло 1156, из них местных — 542. Более 89 % больных было выявлено в Масисском и Арташатском районах. Благодаря значительной финансовой и научно-практической помощи ВОЗ, ЮНИСЕФ, ПРООН, Международной федерации Красного Креста и Красного Полумесяца, Всемирной продовольственной программы, Всемирного Банка, правительств Италии и Норвегии, эпидемия малярии была остановлена, и в 2003 г. зарегистрировано лишь 8 местных случаев. Основными противомалярийными мероприятиями были: внутридомовые обработки в активных очагах, ранняя диагностика и радикальное лечение больных малярией, подготовка медицинских кадров и санитарно-просветительная работа среди жителей районов — очагов заболевания.

Грузия. В 1998—1999 гг. в результате завоза трехдневной малярии сезонными рабочими из пограничных горных районов Азербайджана возникла местная передача трехдневной малярии в Йорской и Алазанской долинах, которая в 2000 г. достигла 164 случаев. В 2001 г. малярия распространилась в Западную Грузию, и в 2003 г. было выявлено 308 заболевших. Благоприятные условия для местной передачи малярии существуют на 52 % территории страны, где проживает 90 % населения. Особенно опасно восстановление местной передачи в районах Колхидской низменности, на побережье Черного моря. Отсутствие учреждений санэпидслужбы в структуре здравоохранения этой страны не позволяет осуществлять эффективный эпидемиологический надзор.

Кыргызстан. В 2001 г. было выявлено 28 случаев трехдневной малярии, из которых 15 обусловлено местной передачей в пограничных с Таджикистаном районах Республики. Вследствие миграции населения малярия распространилась в пограничные с Узбекистаном области Ферганской долины (Баткенская, Жалалабадская, Ошская), где развито рисосеяние и возникли большие анофелогенные обводненные территории. В 2002 г. было зарегистрировано 2712 случаев трехдневной малярии. Однако исследования 120 препаратов крови больных в контрольной лаборатории сотрудничающего с ВОЗ Центра (Москва) выявили наличие *P. vivax* только в 60 препаратах, т. е. имела место микроскопическая гипердиагностика.

Таджикистан. В 2000 г. было зарегистрировано 19 064 случая малярии, в последующие годы ситуация постепенно улучшалась: в 2002 г. число случаев уменьшилось до 6160, в 2003 г. — до 5428. Однако возросло число паразитоносителей трехдневной малярии (до 20 %) среди населения из-за неполноценного лечения больных. Кроме того, доля случаев тропи-

ческой малярии, завезенной из Афганистана, достигает в среднем 10 % общего числа больных малярией. USAID (США) передала Европейскому бюро ВОЗ на борьбу с малярией в Таджикистане и Кыргызстане в 2004 г. 800 тыс. ам. долларов.

Туркменистан. После вспышки заболевания среди военнослужащих (103 больных) в 1998 г. в Гушге — самой южной точке СНГ — в стране ежегодно регистрировали 15—20 случаев трехдневной малярии в результате завоза демобилизованными пограничниками и залета зараженных комаров из Афганистана. В 2003 г. число таких случаев увеличилось до 46 в нескольких велятах страны, что свидетельствует об ухудшении ситуации. Маляриогенный потенциал, достаточный для осуществления местной передачи малярии, существует на территории Тедженского и Мургабского оазисов.

Узбекистан. В результате интенсивных миграций населения и завоза малярии из Таджикистана в 2000 г. число случаев малярии достигло 80 (из них 46 местных случаев в Сурхан-Дарьинской области). В 2002 г. было зарегистрировано 74 случая малярии (из них только 11 местных), в 2003 г. — 41 (33 местных). Очевидно недовыявление источников инфекции, поскольку в 2003 г. в России среди прибывших из Узбекистана граждан было зарегистрировано 11 завозных случаев. Полевые исследования показали, что только Ферганская популяция *An. superpictus* резистентна к малатиону, фенитропону, бендиокарбу и пропоксуру. Малярийные комары других видов сохранили чувствительность к этим инсектицидам.

В отличие от вышеуказанных территорий за пределами мирового ареала *P. vivax* ситуация иная. Такие факторы, как эффективные южные виды малярийных комаров и длинный сезон передачи (май—сентябрь) с благоприятными среднесуточными температурами воздуха, также характерны для Южной Европы, включая юг Европейской части России, но эпидемический процесс малярии там отсутствует. Стабильной передачи малярии через местных комаров нет ни в США, ни в Голландии, Германии и Великобритании, где климат более теплый, чем в России, а завоз малярии из Азии и Африки достигает 5000 случаев в год. Малярия отсутствует на территориях многих стран умеренного и субтропического поясов в западном и восточном полушариях и лишь иногда встречается в виде спорадических случаев местной передачи, вторичных от завозных (Baldari et al., 1998; Curtis, White, 1983; Gentilini, Danis, 1981).

Этот феномен, возникший после ликвидации малярии в СССР к 1960 г., В. Н. Беклемишев (1959) назвал „анофелизмом без малярии”. Его частично объясняют изложенные ниже результаты изучения второй группы факторов, характеризующих видовые особенности переносчиков малярии фауны России.

Особенности местных переносчиков малярии — комаров *Anopheles*

На территории России обитает десять видов малярийных комаров, но эффективными переносчиками являются только три: *An. maculipennis*, *An. atroparvus*, *An. sacharovi*. Наиболее распространен северный вид — *An. messeae*, но в пределах его ареала сезон эффективной заражаемости малярией короткий (от 30 до 80 дней); уже в августе появляются диапаузирующие самки (этот вид уходит на зимовку без кровососания). Так, лето 2003 г. было прохладным и сезон передачи малярии в Москве и Московской области составил 40 дней (фактически был возможен один оборот инфекции, равный 25 дням при трехдневной малярии). В связи с этим число случаев местной передачи сократилось вдвое по сравнению с 2002 г.: 61 и 121 соответственно, а в целом по России — со 139 до 72 случаев (рис. 1). В последние три года почти половину всех завозных в Россию случаев малярии составил завоз из ближнего и дальнего зарубежья в разные округа Москвы и населенные пункты Московской области, привлекательные для мигрантов.

Что касается способности комаров заражаться завозными фенотипами малярии, то эти свойства не претерпели существенных изменений на протяжении второй половины XX в. В лабораторных экспериментах, выполненных в разных европейских странах с различными видами *Anopheles*, была показана высокая восприимчивость местных переносчиков к *P. vivax* из Южной Америки, Юго-Восточной Азии и Африки (Dashkova, Rasnitsyn, 1982). Попытки заразить малярийных комаров возбудителями тропической малярии из Африки и Азии в лабораторных экспериментах в России, Азербайджане, Италии, Великобритании в 70—90-х годах не увенчались успехом (Баранова и др., 2000; Джавадов и др., 1978; Dashkova, Rasnitsyn, 1982). Укоренение *P. falciparum* в Европе менее вероятно, чем *P. vivax*. Это в первую очередь связано с тем, что основной завоз *P. falciparum* в Европу происходит из Африки, а многие малярийные комары европейской фауны, как было указано выше, рефрактерны к африкан-



Рис. 1. Динамика числа случаев малярии, выявленных в России, по месяцам 2003 г.

ским фенотипам *P. falciparum*. Кроме того, как подтверждает ситуация в странах Малой Азии, после возврата трехдневной малярии (*P. vivax*) возобновления передачи *P. falciparum* не было.

Миграции российских граждан в тропики и жителей эндемичных стран ближнего и дальнего зарубежья в Россию

В настоящее время главную роль в распространении малярии в странах СНГ играют массовые миграции населения. Спектр миграций различный — от планового и организованного переселения, связанного с потребностями в рабочей силе, до хаотичного перемещения людей в поисках заработка или спасения от военных конфликтов.

Существуют различные ситуации в отношении риска заражения малярией и заноса возбудителя на эндемичную территорию. Так, военный конфликт между Арменией и Азербайджаном за Нагорный Карабах в начале 90-х годов XX в. привел к появлению более миллиона беженцев-азербайджанцев с территорий, занятых Арменией. Среди них были больные трехдневной малярией, а высокоэффективный переносчик *An. sacharovi* способствовал эпидемическому подъему заболеваемости. Наряду с этим в Араратской долине Армении после почти 40-летнего отсутствия с 1996 г. появилась местная передача трехдневной малярии, вследствие завоза инфекции военнослужащими из пограничных с Азербайджаном районов. Другой иллюстрацией последствий гражданской войны является эпидемия трехдневной малярии в Таджикистане, начавшаяся в 1993 г. и не прекращающаяся и по сей день. Миллионы беженцев в пограничные пораженные малярией районы Афганистана и обратно, отсутствие эффективного эпидемиологического надзора на территории страны и массовые миграции населения в поисках работы привели к укоренению малярии в Таджикистане, вероятно, навсегда.

В настоящее время наблюдается дальнейшая экспансия малярии из Таджикистана в соседние государства Центрально-Азиатского региона (Ejov et al., 2002). Случаи трехдневной малярии возникают в пограничных с Таджикистаном районах Сурхан-Дарьинской области Узбекистана, на территории Ферганской и Чуйской долин Кыргызстана.

Миграции россиян в страны жаркого климата значительно возросли после распада СССР и появления свободы передвижений. Основные контингенты, выезжающие в тропики и субтропики:

- туристы по индивидуальным или коллективным маршрутам;
- экипажи пассажирских и военных судов и самолетов;
- бизнесмены и коммерсанты;
- специалисты-контрактники (военнослужащие, геологи, металлурги, шахтеры);
- паломники (буддисты, кришнаиты, мусульмане).

В настоящее время Европа представляет собой одну из важнейших иммиграционных территорий. В начале 1990-х годов среди 325 млн. населения стран, входивших в Европейский Союз, 13,3 млн. были мигрантами. Из них 8,3 млн. являлись выходцами из стран, не входивших в Европейский Союз (Our planet..., 1992). Многие мигранты прибыли из эндемичных по малярии стран или посещали такие страны во время передвижения, особенно нелегальные.

По оценкам Международной туристической организации и Ассоциации путешественников, во Франции, Англии, США проживают по 1 млн. граждан, ежегодно путешествующих в тропики и субтропики, в Швейцарии, Бельгии, Голландии, Германии — по 500—600 тыс. (Kain et al., 1998). Их информированность о мерах личной профилактики инфекционных болезней низкая: в Англии информировано 46 % путешественников, в США — 40 %, в Бельгии — 25 %. Несмотря на посещение врача перед выездом в зону риска заражения, только 11 % туристов употребляет лекарственные препараты для профилактики и 17 % — средства защиты от укусов насекомых (Сергиев, Баранова, 1996; Legros, Danis, 1998). Среди причин пренебрежения мерами защиты они называли спешку, забывчивость, неорганизованность. Из европейских стран только в Англии, Франции и Швейцарии существует эпидемиологический надзор за контингентом путешественников, возвратившихся домой на самолетах.

Случаи с летальным исходом вследствие тропической малярии ежегодно регистрируют среди экипажей судов и самолетов, постоянно курсирующих из Европы в Экваториальную Африку. В последние годы возросло число случаев малярии среди моряков, нанимающихся на работу по контрактам на судах Черноморского флота и иностранных судах. Этот контингент ежегодно составляет 2—3 % заболевших россиян и 20—30 % заболевших малярией граждан Украины. Среди них отмечены летальные исходы из-за медицинской некомпетентности экипажей, отсутствия мер профилактики малярии в зонах риска заражения в тропиках и безответственности судовладельцев. Количество российских моряков, работающих под „другим флагом”, оценивают в 50 000 человек — второй показатель после Филиппин (240 000 человек). В настоящее время в мире среди команд, состоящих из представителей одной страны и получивших работу под иностранным флагом, 16 % — российские. По этому показателю в СНГ Россия уступает Украине (27 %). Уровень смертности среди моряков, работающих на таких судах, в два раза выше соответствующего показателя на судах под национальным флагом (Захарова, 2002).

Контингенты иностранцев, ежегодно прибывающих в Россию, во много раз превышают контингенты выезжающих в жаркие страны россиян. Среди них:

— сезонные рабочие из стран СНГ и Турции (строители, грузчики, дворники);

- торговцы из Азербайджана, Узбекистана и Таджикистана;
- работники нефтяной и газовой промышленности из Азербайджана и Туркменистана;
- студенты высших и средних учебных заведений;
- беженцы и вынужденные переселенцы из неблагополучных по малярии стран.

Ухудшение маляриологической ситуации на территории Европейской части России произошло в конце 90-х годов, когда завоз трехдневной малярии из Таджикистана и Азербайджана намного превысил завоз из стран Азии и Африки (рис. 2). Большинство завозных в Россию случаев малярии регистрируют в крупных городах (Москве, Санкт-Петербурге, Челябинске, Перми, Тюмени, Казани, Уфе), а также в разных районах Московской, Астраханской, Волгоградской, Самарской областей. Завоз трехдневной малярии коммерсантами из Азербайджана и сезонными рабочими из Таджикистана составил 80 % общего числа случаев. По оценкам экспертов, ежегодно около 2 млн. граждан Азербайджана и Таджикистана приезжают на заработки в Россию. Однако реальную опасность распространения малярии составляют завозные случаи трехдневной малярии (*P. vivax*) на маляриогенных территориях России в сезоне эффективной заражаемости комаров в случаях позднего выявления больных (с 5-го дня болезни и более). В 2003 г. на 65 административных территориях России таких случаев было только 250, поэтому риск заражения был незначительным.

Возможен завоз возбудителя комарами на транспортных средствах и занос ветром. Дальность разлета комаров, как правило, не превышает нескольких километров, но с потоком воздуха комары могут переноситься на сотни километров (Ritchie, Rochester, 2001).

В литературе имеются публикации об „аэропортной” или „багажной” тропической малярии в 90-х годах в аэропортах Рима, Парижа, Женевы, Брюсселя, Люксембурга (Giacomini et al., 1995; Isaacson, 1989). Специаль-

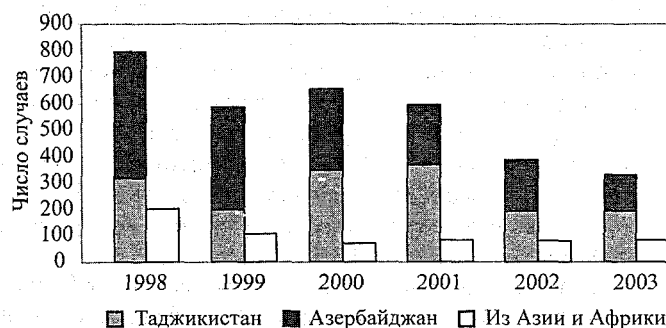


Рис. 2. Число завозных случаев малярии в Россию из дальнего и ближнего зарубежья (1998—2003 гг.).

ные исследования, проведенные в аэропорту Gatwick (Лондон), показали, что комары были обнаружены в 12 из 67 самолетах, прибывших из тропических стран. Известны опыты R. S. Russell (1987) по изучению поведения самок комаров (в садках), помещенных в отсеках для шасси „Боинга-747”. В 6 полетах (от 2 до 9 часов) выживало более 80 % комаров. Временное оцепенение не повлияло на их жизнеспособность, после приземления они были способны к полетам. Прямым доказательством транспортировки зараженных переносчиков самолетами служат три случая заражения тропической малярией внутри самолета во время трансконтинентального перелета (Cimerman et al., 1997).

Случаи малярии с неясной этиологией, зарегистрированные у проживающих около международных аэропортов местных жителей, стали называть „аэропортной малярией” (Isaacson, 1989). Этот термин, вероятно, появился в 70-х годах (в результате неправильного перевода французского выражения „paludisme aéroporté” — „малярия, передаваемая воздушным путем”) для обозначения случаев заражения в период краткого пребывания пассажиров в аэропорту эндемичной страны или в результате укусов комаров во время полета (Gentilini, 1981).

В 1971—1995 гг. в странах Западной Европы около международных аэропортов был зарегистрирован 61 случай малярии; в 1996—2000 гг. — 23 случая. За 1971—2000 гг. большинство случаев было зарегистрировано во Франции: 38 % от всех зарегистрированных в Европе. Аэропортная малярия была также зарегистрирована в Нидерландах, Бельгии, Испании, Италии. Единственный летальный исход в результате тропической малярии был зарегистрирован у местного жителя Женевы, не выезжавшего в жаркие страны и не делавшего переливания крови (Legros, Danis, 1998).

Не исключена возможность завоза зараженных комаров в грузовых и пассажирских салонах самолетов, прибывающих в Россию из тропиков. Профилактическую обработку от комаров помещений самолетов перед вылетом из тропиков экипажи не проводят, несмотря на требования Санитарных правил по охране территории Российской Федерации. В Московской области (г. Долгопрудный) в июле 1999 г. были зарегистрированы три случая тропической малярии у солдат срочной службы, не выезжавших за пределы области. Военная часть, где служили заболевшие, находится на расстоянии 3—4 км от Международного аэропорта Шереметьево, куда ежедневно прибывают самолеты из эндемичных стран (в июле 1999 г. — до 50 самолетов в день). Поэтому есть все основания классифицировать эти случаи от завоза зараженных комаров как аэропортную малярию (Баранова и др., 2000).

Дальнейшее распространение малярии через местных переносчиков от больного маловероятно, так как аэропортная малярия почти всегда связана с *P. falciparum*. Поэтому заражение местных жителей через экзотических для данной местности комаров обычно ограничивается единичными случаями малярии.

Влияние хозяйственной деятельности населения на распространение малярии

Осуществление программ преобразования природы оказало двойственное воздействие на состояние здоровья населения и распространение малярии в XX в. Так, осушение болот, рассадка эвкалиптовых рощ в Закавказье привели к оздоровлению среды обитания и ликвидации стойких очагов малярии. Однако большинство сельскохозяйственных проектов создало предпосылки для распространения трансмиссивных болезней человека, в частности: гидростроительство и освоение водных ресурсов, интенсификация сельского хозяйства и освоение земель.

Освоение новых земель под сельскохозяйственное производство на равнинах Таджикистана в конце 1940-х годов сопровождалось переселением жителей высокогорных селений. Появление большого числа не иммунных жителей на маляриогенной территории привело к значительному росту заболеваемости.

Международный ирригационный проект GAP в провинции Чукурова в Турции обусловил в 70-х годах восстановление малярии на этой территории (Onođi, Grab, 1980). Это было связано с резким увеличением численности высокоэффективного переносчика *An. sacharovi* в связи с появлением больших площадей анофелогенных водоемов. Наряду с этим массовый приток сезонных рабочих на освоенные территории обусловил эпидемическое распространение малярии. В отличие от местного населения, сезонные рабочие жили в вагончиках и палатках и были более подвержены укусам малярийных комаров. Поэтому заболеваемость малярией среди сезонных рабочих была значительно выше, чем среди местных жителей. В конце 70-х годов эпидемия достигла максимума (около 120 тыс. больных) и местная передача малярии произошла в 13 провинциях страны. Более того, в ряде стран Западной Европы были выявлены многочисленные случаи малярии среди мигрантов из Турции (Velimirovic, 1984). Таким образом, отсутствие эпидемиологического прогноза при осуществлении проекта орошения земель способствовало распространению малярии и привело к значительному экономическому ущербу.

„Зеленая революция” — широкомасштабные работы по увеличению продуктивности сельского хозяйства путем ирригации в Индии — привела к возврату малярии и ее эпидемическому распространению на ранее освобожденных от этой болезни территориях.

Эпидемическому подъему заболеваемости трехдневной малярией в Таджикистане в 90-х годах способствовала замена хлопководства на рисосеяние (Алиев, 2000). В результате многочисленные рисовые поля появились возле усадеб жителей в сельских районах Республики и создали огромные анофелогенные площади, увеличившие численность комаров, а также контакт человека с переносчиком.

Потенциально любое изменение природных предпосылок может вызывать трансформацию ареалов переносчиков. Выявление природных факторов, потенциально опасных из-за возможных отрицательных последствий осуществления проектов, — это сложная и важная задача. Факторы, требующие оценки, включают: виды переносчиков, устойчивость к инсектицидам, сезонный ход численности основных видов переносчиков, длительность периода эффективной заражаемости комаров, степень антропо- и эндофилии; дальность полета комаров.

Социальный и культурный уровни населения

В эндемичных по малярии местностях важным профилактическим мероприятием является санитарно-просветительная работа среди населения, поскольку знания жителей о симптомах малярии способствуют значительному увеличению обращаемости в медицинское учреждение и своевременному выявлению источников инфекции. Применение средств защиты от укусов насекомых (репелленты, пологи, засетчивание окон и дверей), понимание необходимости обработки помещений в очагах малярии повышают качество противомаларийных мероприятий и препятствуют распространению малярии.

Оценка уровня знаний о малярии и мерах профилактики на основе анкетирования населения позволяет определить необходимый объем и возможности применения противомаларийных мероприятий в населенном пункте. Медицинские работники должны в доступной форме доносить до населения нужную информацию, для того чтобы не допустить самолечения и уменьшить недоверие жителей к службам здравоохранения. Для улучшения санитарного просвещения необходимы простые и наглядные плакаты, памятки, выступления в прессе, на радио и телевидении.

Выводы

1. Природно-климатические условия обуславливают маляриогенный потенциал территории, но массовые миграции населения из эндемичных стран являются основным фактором в распространении малярии.
2. Целенаправленный мониторинг переносчиков трансмиссивных болезней путем организации пунктов энтомологических наблюдений должен быть не только на отдельных территориях, но и вблизи международных морских портов и аэропортов для своевременного обнаружения завозных переносчиков.
3. Профилактические дезинсекционные мероприятия и защита от укусов комаров обязательны в местах проживания организованных контингентов мигрантов.
4. Медицинское страхование мигрантов будет способствовать оказанию своевременной медицинской помощи лицам, заболевшим на террито-

рии России, и сокращению сроков возможного заражения для окружающих лиц.

5. Заключение договоров о найме на работу мигрантов не менее чем на 5 месяцев (май—сентябрь) позволит им избежать заражения сезонными инфекциями на родине.

6. Проведение экспертизы и разработки эпидемиологического прогноза необходимо до начала осуществления проектов экономического и социального развития на конкретной территории.

7. Необходима межведомственная интеграция и включение проблем здравоохранения во все природоохранные и преобразующие проекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алиев С. П. 2000. Ситуация по малярии в Республике Таджикистан. — Мед. паразитол., № 2, с. 27—29.
- Баранова А. М., Сергиев В. П., Артемьев М. М., Лексикова Л. В., Коваленко Э. Б. 2000. Местные случаи тропической и трехдневной малярии в Московской области. — Мед. паразитол., № 2, с. 34—36.
- Беклемишев В. Н. 1959. Пространственная и функциональная структура популяций. — Бюллетень МОИП. — М., вып. 2, с. 41—50.
- Захарова В. А. 2002. Заболеваемость малярией среди моряков на Украине в 1997—2001 гг. — Доклады XII конференции Украинского научного общества паразитологов. — Севастополь, с. 8—10.
- Джавадов Р. Б., Трофимов Г. К., Куроченко Г. Н. 1978. Восприимчивость *An. sacharovi* и *An. subalpinus* к завозным из Африки возбудителям малярии. — Мед. паразитол., № 1, с. 84—87.
- Сергиев В. П., Артемьев М. М., Баранова А. М. 2000. Руководство по эпидемиологическому надзору за малярией в Российской Федерации. — М. — 120 с.
- Сергиев В. П., Баранова А. М. 1996. Профилактика инфекционных и паразитарных болезней для выезжающих за рубеж. — СПИД-ИНФО. — М. — 80 с.
- Baldari M., Tamburro A., Sabatinelli G., Romi R., Severini C. et al. 1998. Malaria in Maremma, Italy. — *Lancet*, N 351, p. 1246—1247.
- Cimerman S., Barata L. C., Pignatelli A. C., Di Santi S. M. et al. 1997. Malaria transmission associated with airplane travel. — *Bras. J. Infect. Dis.*, v. 1, N 3, p. 135—137.
- Curtis C. F., White G. 1984. *Plasmodium falciparum* transmission in England: entomological and epidemiological data relative to cases in 1983. — *J. Trop. Med. & Hyg.*, v. 87, p. 101—114.
- Dashkova N. G., Rasnitsyn S. P. 1982. Review of data on susceptibility of mosquitos in the USSR to imported strains of malaria parasites. — *Bull. WHO*, v. 60, N 6, p. 893—897.
- Ejov M., Alyev S., Shamgunova G., Shapieva Z., Usenbaev N., Amangeldyev K. 2002. The malaria situation in the countries of the Central-Asian Region affected by re-emerging malaria. Bishkek: *WHO Euro/RBM*.
- Gentilini M., Danis M. 1981. Le paludisme autochtone. — *Med. et Malad Infect.*, v. 3, p. 356—362.
- Giacomini T., Muochet J., Mathieu P., Petithory J. C. 1995. Study of 6 cases of malaria acquired near Roissy-Charles-de-Gaulle in 1994. — *Bull. Acad. Natl. Med.*, N 179, p. 335—351.

Isaacson M. 1989. Airport malaria: a review. — *Bull. World Health Organ.*, v. 67, N 4, p. 737—744.

Kain K. C., Harrington M. A., Tennyson S., Keystone J. S. 1998. Imported malaria: prospective analysis of problems in diagnosis and management. — *Clin. Infect. Dis.*, v. 27, N 1, p. 142—149.

Legros F., Danis M. 1998. Surveillance of malaria in European Union countries. — *Eurosurveillance*, v. 3, p. 45—47.

Martens P., Kovats R. S., Nijhof S., De Vries P., Bradley D. J. 1999. Climate change and future populations at risk of malaria. — *Global Environment Change*, S9, p. 89—107.

Onori E., Grab B. 1980. Quantitative estimates of the evolution of a malaria epidemic in Turkey if remedial measures had not been applied. — *Bull. WHO*, v. 58, N 2, p. 321—326.

Our planet, our health. 1992. *Report of the WHO Commission on Health and Environment*. Geneva, World Health Organization.

Rajagopalan P. K., Jambulingam P., Sabesan S. et al. 1986. Population movement and malaria persistence in Rameswaram Island. — *Soc. Sci. Med.*, v. 22, N 1, p. 879—886.

Ritchie S. A., Rochester W. 2001. Wind-blown mosquitoes and introduction of Japanese encephalitis into Australia. — *Emerging infectious diseases*, v. 7, N 5, p. 900—903.

Russell R. C. 1987. Survival of insects in the wheel bays of a Boeing 747B aircraft on flights between tropical and temperate airports. — *Bull. World Health Org.*, v. 65, N 3, p. 659—662.

Velimirovic B. 1984. *Infectious diseases in Europe: a fresh look*. Copenhagen: Euro/WHO.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА
ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ И ЧИСЛЕННОСТИ ШМЕЛЕЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

В. В. Ясюкевич, Л. Е. Ривкин

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Victor_PEMME@comcor.ru

Реферат. Важным аспектом мониторинга окружающей среды является оценка состояния популяций животных и растений, а также видового состава биоценозов (мониторинг биоразнообразия). Проведен учет численности и биоразнообразия шмелей (*Bombus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) и их гнездовых паразитов — шмелей-кукушек (*Psithyrus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) в городе Москве (антропогенный и естественный, „неурбанизированный” ландшафты) и на территории Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника. Показано, что в антропогенном городском ландшафте число видов шмелей уменьшается (за 20 лет с 13 до 6 видов), а в неурбанизированном городском ландшафте и на территории заповедника остается высоким и неизменным (13 и 12 видов соответственно). Причины резкого сокращения численности и биоразнообразия шмелей в городских антропогенных ландшафтах заключаются в действии неблагоприятных климатических факторов и росте антропогенной нагрузки на биоценозы, в первую очередь в разрушении типичных для шмелей биотопов и замещении последних окультуренными городскими биотопами, малопригодными для жизнедеятельности этих полезных и красивых насекомых. Рекомендуется создание небольших энтомологических заказников на неосвоенных городских территориях.

Ключевые слова. *Bombus*, *Psithyrus*, шмели, шмели-кукушки, численность, биоразнообразие, антропогенный ландшафт, неосвоенные городские территории, заповедные условия.

**THE USE OF RESULTS OF MONITORING OF SPECIES DIVERSITY
AND ABUNDANCE OF BUMBLE BEES FOR THE ASSESSMENT
OF ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT**

V. V. Yasjukevich, L. E. Rivkin

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya st.,
107258 Moscow, Russia, Victor_PEMME@comcor.ru

Abstract. The essential aspect of environmental monitoring is an assessment of animal and plant populations as well as species composition of ecosys-

tems (monitoring of biodiversity). The abundance and biodiversity of bumble bees (*Bombus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) and their nest parasites cuckoo bees (*Psithyrus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) in the city of Moscow (within anthropogenic and natural (non-urbanized) landscapes) and at the territory of the Prioksko-Terrasny state wildlife biosphere reserve have been assessed. It was shown that within the anthropogenic urban landscape a number of bumble bee species declined (from 13 to 6 species over 20 years), while within the natural urban landscape and at the territory of the reserve it remains unchangeable and high (13 and 12 species, respectively). The reasons for the abrupt reduction in the abundance and biodiversity of bumble bees within the urban anthropogenic landscapes are unfavorable climatic factors and increasing anthropogenic pressure on the ecosystems, primarily disruption of biotopes typical for the bumble bees and substitution of them with the urbanized biotopes, which are not suitable for the life activity of these useful and nice insects. The establishment of small entomological reserves within yet unreclaimed urban territories is recommended.

Keywords. *Bombus*, *Psithyrus*, bumble bees, cuckoo bees, population, biodiversity, anthropogenic landscape, unreclaimed urban territories.

Введение

Наряду с определением концентраций загрязняющих веществ важнейшим аспектом мониторинга окружающей среды является контроль состояния популяций животных и растений, а также видового состава биоценозов (мониторинг биоразнообразия). Уменьшение числа видов, снижение численности их популяций в большинстве случаев свидетельствуют о повышении уровня загрязнения окружающей среды и разрушении биотопов, в которых данные виды животных и растений обитают. Таким образом, изменение численности популяций и характеристик биоразнообразия может служить интегрирующим показателем состояния окружающей среды. В данном контексте нами проведен учет численности и биоразнообразия шмелей (*Bombus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) и их гнездовых паразитов шмелей-кукушек (*Psithyrus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) в городе Москве и на территории Приокско-Тerrasного государственного природного биосферного заповедника.

Шмели (*Bombus*, *Apidae*, *Hymenoptera*) — группа насекомых, имеющих большое практическое значение. Очень велика их роль как опылителей многих дикорастущих и культурных растений (Гребенников, Гребенников, 1983; Гребенников, 1984; Афиногенов, Золотарева, 1988; Мадебейкин, 1997, 2002; Богатырев, 2001; Stubbs, Drummond, 2001). В последнее время усилился интерес к использованию шмелей в защищенном грунте (Зарецкий, Пужевич, 1996; Бейтелар, 1997; Богатырев, 2001; Navez, 1990; Dag, Kammer, 2001). Разработаны методики лабораторного разведения

шмелей с целью использования их в теплицах для опыления выращиваемых там растений, существуют специализированные фирмы, производящие шмелиные семьи на продажу (Комиссар, Миронов, 1993; Богатырев, 2001; Weber, 1990). По сравнению с медоносными пчелами шмели как опылители имеют ряд преимуществ. Их хоботок гораздо длиннее, что незаменимо для растений, имеющих глубокий венчик. Фуражировочные полеты шмелей начинаются по времени суток раньше, чем у пчел, а заканчиваются позже. Дождливая и ветреная погода ограничивает их активность в меньшей степени, чем пчел. Шмели летают при более низкой температуре, чем медоносные пчелы. От цветка к цветку шмели перемещаются также быстрее. Недостатком шмелей как опылителей можно считать то, что их семьи относительно малочисленны. Крупные семьи шмелей в конце сезона могут насчитывать несколько сотен особей, тогда как в семье медоносных пчел могут жить многие сотни тысяч рабочих (Дождиков, 1990). И, наконец, шмели, как и многие другие крупные и красивые насекомые, имеют большое эстетическое значение.

Методика

В качестве полигона для исследований была выбрана территория муниципального округа (МО) „Нагатинский затон” (современное название, ранее местность называлась микрорайон „Нагатино” (Пролетарский район г. Москвы)). Эта территория представляет собой хороший пример постепенной урбанизации местности. В конце 60-х годов наряду с многоэтажными жилыми домами имелась и застройка деревенского типа, часть площади занимали неосвоенные участки левобережья Нагатинской поймы, поросшие ивой, а также свалки на месте песчаных карьеров. В первой половине 70-х годов деревни были выселены, а дома сломаны, заполнение свалок прекратилось. На этих местах образовались обширные пустоши, заросшие обильной растительностью, среди которой значительную часть занимали медоносы (клевер, донник, бурачниковые и губоцветные). Это обеспечивало шмелям пищу в течение теплого времени года, места для гнездования и зимовки. К концу 80-х годов практически все неосвоенные территории были застроены многоэтажными жилыми домами, что, конечно, привело к уничтожению значительной части растительности. В последующие годы сокращение растительного покрова продолжалось.

В конце 70-х — начале 80-х годов на территории микрорайона „Нагатино” проводились сборы шмелей. По коллекционному материалу и дневниковым записям был проведен ретроспективный анализ, позволивший установить количество видов и их численность для указанного периода времени. Эти данные в настоящей публикации приняты за базовый уровень.

Весной (с конца апреля по начало июня) 2000—2004 гг. проводился учет шмелей по перезимовавшим самкам. Численность оценивалась по балльной системе:

- xxxx — вид обилен
- xxx — обычен
- xx — редок
- x — единичные находки
- — не обнаружен.

Для сравнения аналогичные учеты были проведены в 2002—2004 гг. в Приокско-Террасном заповеднике, а также на территории Нагатинской поймы (правый берег р. Москвы) (только в 2004 г.). Приокско-Террасный заповедник является по своим макроклиматическим условиям эталонной для Москвы территорией, а Нагатинская пойма, отделенная от МО „Нагатинский затон” руслом р. Москвы, являет собой пример вкрапления неосвоенной территории в городскую застройку, в которой сохранились луго-пойменные биотопы с лесными участками (основная лесообразующая порода — ива).

Результаты

Как следует из приведенных в табл. 1 данных, на территории МО „Нагатинский затон” в конце 70-х — начале 80-х годов зарегистрировано 12 видов шмелей. Семь из них были вполне обычными для данной местности, а два вида (*B. lucorum* и *B. terrestris*) встречались в большом количестве. В других районах Москвы, кроме указанных в таблице видов, были в разные годы пойманы *B. solstitialis* Pz. и *B. tristis* Seidl., а в пределах Московской области — *B. semenoviellus* Skorikov и *B. muscorum* F.

Спустя два десятилетия, в 2000 г., число видов уменьшилось на четверть, не отмечены виды, встречавшиеся ранее в единичных экземплярах, однако обнаружен вид (*B. soroensis*), не встречавшийся в сборах конца 70-х — начала 80-х годов. Таким образом, в 2000 г. на территории МО „Нагатинский затон” зарегистрировано 9 видов шмелей. Численность шмелей значительно сократилась. Большая часть обычных видов перешла в категорию редких. Обычными же остались лишь два вида, которые ранее были наиболее многочисленными: *B. lucorum* и *B. terrestris*. Редкие и встречавшиеся единично виды исчезли.

В 2001 г. в категории обычных остался один вид — *B. terrestris*. Вид *B. derhamellus* отмечен в единичных случаях. В 2002 г. все виды, кроме *B. terrestris* L, ставшего редким, отмечались единично, а *B. derhamellus* исчез совсем. Вид *B. soroensis* в сборах указанных лет не отмечен. В 2003 г. численность *B. terrestris*, *B. lucorum*, *B. hypnorum* и *B. pratorum* несколько возросла по сравнению с предыдущим годом (см. табл. 1), но *B. hortorum* отмечен не был. Число зарегистрированных во время учетов видов составляло соответственно 8, 7 и 7. В 2004 г. число видов сократилось до 6. Доминирующим видом по-прежнему является *B. terrestris*, редкими — *B. lucorum* и *B. lapidarius*. Виды *B. agrorum*, *B. pratorum* и *B. hypnorum*

Таблица 1

Видовой состав и численность шмелей на территории муниципального округа „Нагатинский затон” г. Москвы

Вид	Данные конца 70-х — начала 80-х годов	Дан- ные 2000 г.	Дан- ные 2001 г.	Дан- ные 2002 г.	Дан- ные 2003 г.	Дан- ные 2004 г.
<i>Bombus</i> Latr.						
1. <i>B. lucorum</i> L.	xxxx	xxx	xx	x	xx	xx
2. <i>B. terrestris</i> L.	xxxx	xxx	xxx	xx	xxx	xxx
3. <i>B. hortorum</i> L.	xxx	xx	xx	x	-	-
4. <i>B. hypnorum</i> L.	xxx	xx	xx	x	xx	x
5. <i>B. agrorum</i> F.	xxx	xx	xx	x	x	x
6. <i>B. lapidarius</i> L.	xxx	xx	xx	x	x	xx
7. <i>B. derhamellus</i> Kby.	xxx	xx	x	-	-	
8. <i>B. pratorum</i> L.	xx	xx	xx	x	xx	x
9. <i>B. equestris</i> F.	x	-	-	-	-	-
10. <i>B. subterraneus</i> <i>latreillellus</i> Kby.	x	-	-	-	-	-
11. <i>B. distinguendus</i> F.Mor.	x	-	-	-	-	-
12. <i>B. silvarum</i> L.	x	-	-	-	-	-
13. <i>B. soroensis</i> F.	-	x	-	-	x	-
<i>Psithyrus</i> Lep.						
1. <i>P. bohemicus</i> Seidl.	xxx	x	x	x	x	-
2. <i>P. campestris</i> Pz.	xx	-	-	-	-	-
3. <i>P. barbutellus</i> Kirby	xx	-	x	-	-	-
4. <i>P. rupestris</i> F.	x	-	x	-	x	-

встречаются единично. Таким образом, тенденция к уменьшению численности биоразнообразия шмелей в 2001—2004 гг. продолжала сохраняться.

С жизнью шмелей тесно связано существование их гнездовых паразитов — шмелей-кукушек (род *Psithyrus*) (Мадебейкин, 1998). Уменьшение их видового состава и численности еще более существенно, чем их хозяев-шмелей (см. табл. 1). Из четырех ранее встречавшихся видов шмелей-кукушек на территории МО „Нагатинский затон” в 2000 г. удалось обнаружить лишь один вид (*P. bohemicus*), встречавшийся единично. Однако в 2001 г. вновь появились *P. barbutellus* и *P. rupestris* также в единичных находках. В 2002 г. ситуация была аналогична 2000 г., а в 2003 г., кроме стабильно встречающегося *P. bohemicus*, вновь был отмечен *P. rupestris*. В 2004 г. на исследуемой территории шмели-кукушки выявлены не были.

Для сравнения аналогичные учеты в 2002—2004 гг. были проведены на территории Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника, расположенного на южной границе Московской области недалеко от г. Серпухова (табл. 2). В 2002 г. в заповеднике было выявлено 9 видов шмелей, шмели-кукушки не обнаружены. В 2003 г. обнаружено 10 видов шмелей и 2 вида шмелей-кукушек. Наиболее многочисленным оказался *B. agrorum*. В категорию обычных видов в 2002 г. попал только один *B. lucorum*, а в 2003 г. три вида — *B. lucorum*, *B. terrestris* и *B. pratorum*. Среди шмелей-кукушек обычным, как и в городе, был *P. bohemicus*. В 2004 г. в Приокско-Террасном заповеднике выявлено 12 видов шмелей и 2 вида шмелей-кукушек. Доминирующими в этом году, как и прежде, был *B. agrorum*. Обнаружен не встречающийся в учетах прежних лет редкий вид *B. schrencki*. Среди шмелей-кукушек обычным, как и в городе, был *P. bohemicus*. Вид *P. campestris* встречается в единичных экземплярах. Численность шмелей на территории Приокско-Террасного заповедника высока, а также сохранились виды (*B. distinguendus* и *B. subterraneus*), исчезнувшие в Москве, на подвергающейся урбанизации территории МО „Нагагатинский затон”.

Таблица 2

**Видовой состав и численность шмелей на территории
Приокско-Террасного государственного природного биосферного
заповедника**

Вид	Данные 2002 г.	Данные 2003 г.	Данные 2004 г.
<i>Bombus</i> Latr.			
1. <i>B. agrorum</i> F.	xxxx	xxxx	xxxx
2. <i>B. lucorum</i> L.	xxx	xxx	xxx
3. <i>B. terrestris</i> L.	x	xxx	xxx
4. <i>B. pratorum</i> L.	xx	xxx	xxx
5. <i>B. soroensis</i> F.	x	xx	xx
6. <i>B. schrencki</i> F. Mor.	-	-	xx
7. <i>B. hortorum</i> L.	x	-	x
8. <i>B. hypnorum</i> L.	-	xx	x
9. <i>B. lapidarius</i> L.	xx	x	x
10. <i>B. derhamellus</i> Kby.	-	xx	x
11. <i>B. subterraneus latreillellus</i> Kby.	x	x	x
12. <i>B. distinguendus</i> F. Mor.	x	x	x
<i>Psithyrus</i> Lep.			
1. <i>P. bohemicus</i> Seidl.	-	xxx	xxx
2. <i>P. campestris</i> Pz.	-	x	x

В Нагатинской пойме в 2004 г. было обнаружено 13 видов шмелей (табл. 3). Содоминирующими видами являются *B. lapidarius* и *B. terrestris*. В числе прочих видов были обнаружены *B. silvarum*, *B. subterraneus*, *B. equestris* и *B. distinguendus*, давно не отмечавшиеся на близлежащей территории МО „Нагатинский затон”.

Таблица 3

Видовой состав и численность шмелей на территории Нагатинской поймы (г. Москва)

Вид	Данные 2004 г.	Вид	Данные 2004 г.
<i>Bombus</i> Latr.		7. <i>B. hortorum</i> L.	х
1. <i>B. terrestris</i> L.	хххх	8. <i>B. hypnorum</i> L.	х
2. <i>B. lapidarius</i> L.	хххх	9. <i>B. pratorum</i> L.	х
3. <i>B. lucorum</i> L.	ххх	10. <i>B. equestris</i> F.	х
4. <i>B. derhamellus</i> Kby.	ххх	11. <i>B. distinguendus</i> F. Mor.	х
5. <i>B. agrorum</i> F.	хх	12. <i>B. subterraneus latreillellus</i> Kby.	х
6. <i>B. tristis</i> Seidl.	х	13. <i>B. silvarum</i> L.	х

Обсуждение

Результаты учета шмелей и их гнездовых паразитов — шмелей-кукушек в жилом районе Москвы выявили явную тенденцию к уменьшению количества видов и численности популяций этих полезных насекомых. Так, если в конце 70-х — начале 80-х годов XX в. на территории МО „Нагатинский затон” обитало 12 видов шмелей (а с учетом обнаруженного в 2000 г. *B. soroensis* — то и 13). Два из них были обильными, пять — обычными. На этих видах шмелей паразитировали четыре вида шмелей-кукушек, один из которых встречался обычно, а два — редко. За 2000—2004 гг. число видов шмелей уменьшилось с девяти до шести, шмелей-кукушек регистрируется не более трех видов, а в 2004 г. не было ни одного. Уменьшилась общая численность шмелей, большая часть обычных или обильных видов стала встречаться редко, редкие виды встречаются единично, а виды, встречавшиеся ранее единично, исчезли совсем. Шмели-кукушки встречаются только единично. Эти наблюдения подтверждают ранее установленные закономерности изменения биоразнообразия и численности, связанные с ростом антропогенной нагрузки (Ефремова, 1988; Мельцер, Соромотин, 1998).

В конце 70-х — начале 80-х годов XX в. и в 2000 г. на исследуемой территории в Москве содоминировали два наиболее экологически пластичных вида — *B. lucorum* и *B. terrestris*. По данным 2001—2004 гг., домини-

ровал *B. terrestris*, оставшийся единственным в категории обычных по численности. Этот вид характеризуется еще и устойчивостью (наряду с *B. lucorum*) к загрязнению биотопов солями тяжелых металлов (Kosior, Nosek, 1987), что может означать повышение уровня загрязнения окружающей среды в последние годы.

В Приокско-Террасном заповеднике за 2001—2004 гг. было обнаружено 12 видов шмелей и два вида шмелей-кукушек. Доминантом на данной территории является *B. agrorum*. Это отличие от учетов в городе является вполне естественным, так как указанный вид приурочен в основном к лесным биотопам. О каких-либо тенденциях в изменении численности и биоразнообразия по данным всего за три года говорить вполне определенно преждевременно, однако некоторые отличия исследуемых параметров на заповедной и урбанизированной территориях позволяют предположить, что уменьшения численности и биоразнообразия шмелей в Приокско-Террасном заповеднике в ближайшие годы выявлено не будет. К этим особенностям относятся: большая численность доминирующего вида, наличие достаточного количества видов с высокой численностью, обнаружение крайне малочисленных видов, которые исчезли в антропогенных ландшафтах, значительная численность гнездовых паразитов — шмелей-кукушек. Те же особенности характерны для данных учета шмелей, полученных в Нагатинской пойме, за исключением данных об отсутствии шмелей-кукушек. Последний факт пока не нашел своего объяснения.

Особого рассмотрения требует анализ биоразнообразия шмелей. По данным М. В. Березина и В. Б. Бейко (1995, 1998), в черте Москвы обнаружен 21 вид шмелей, а в Московской области — 22 вида. Однако это общие данные по всему городу и области. В отдельных же районах Москвы, по данным тех же источников, выявляется от 7 до 16 видов, причем в антропогенных ландшафтах число видов шмелей существенно ниже, чем в парках, лесопарках и городских окраинах. Таким образом, отмеченные нами 13 видов для Нагатинского затона (за весь период изучения этой местности), 13 видов для Нагатинской поймы и 12 видов для Приокско-Террасного заповедника достаточно полно представляют фауну шмелей этих весьма ограниченных по сравнению с общей площадью Москвы и Московской области районов. Сравнение с масштабами биоразнообразия шмелей в других исследованных в этом отношении регионах России подтверждает данную точку зрения. Так, в Пензенской области обнаружено 24 вида шмелей и 3 вида шмелей-кукушек (Стойко, Аникин, 2001), в Ставропольском крае — 19 видов шмелей (Ченикалова, 2003), в Орловской области — 15 видов шмелей и 2 вида шмелей-кукушек (Блинников и др., 2000), в Башкирии — 35 видов шмелей (Степанова, 1999), на территории Поволжья — 37 видов шмелей (Ефремова, 1989). В Республике Молдова обитают 23 вида шмелей и 5 видов шмелей-кукушек (Андреев и др., 1991).

Заключение

Причины резкого уменьшения численности и биоразнообразия шмелей в городских условиях заключаются в росте антропогенной нагрузки на биоценозы и действии неблагоприятных климатических факторов. Значительно увеличилась загазованность городского воздуха, все меньше остается мест, пригодных для обитания шмелей. Большой вред популяциям шмелей наносит ставшее систематическим скашивание газонов. Наряду со злаками, которые можно и нужно косить, работники коммунального хозяйства скашивают цветущие клевер, донник и другие насекомоопыляемые растения, лишая шмелей их пищи. На клумбах высаживаются растения, высоко декоративные, но малопригодные для питания шмелей (например, бархатцы, петуния и многие другие). Окультуривание газонов и скверов ведет к тому, что все меньше остается мест, пригодных для гнездования. По окончании вегетационного периода растительные остатки сгребаются с поверхности почвы, а затем вывозятся на свалки или сжигаются на месте. Это приводит к гибели многих насекомых (не только шмелей), зимующих в подстилке. Лишение почвы ее естественного теплоизолятора способствует более легкому промораживанию, что повышает гибель насекомых, зимующих в почве, в том числе и шмелей. Участвовавшие в последние годы затяжные зимние оттепели ведут к повышению гибели зимующих самок, а длительные майские похолодания наряду с аномально теплой погодой в апреле приводят к гибели самок-основательниц и молодые неокрепшие гнезда. Совокупность действия этих неблагоприятных факторов и приводит к тому, что численность шмелей в городе резко уменьшается, а менее экологически пластичные виды исчезают совсем. Проведенные в Нагатинской пойме, окруженной со всех сторон оживленными городскими магистралями, исследования свидетельствуют о том, что химическое загрязнение окружающей среды в городе хотя и значительно, но еще не достигло критической для шмелей величины. Основная причина исчезновения шмелей в антропогенных ландшафтах — разрушение типичных для них биотопов и замещение последних окультуренными городскими биотопами, малопригодными для жизнедеятельности этих полезных и красивых насекомых.

Для сохранения биоразнообразия и численности шмелей необходимо создавать заказники, где будут ограничены всевозможные виды хозяйственной и „окультуривающей” деятельности человека. Принципы функционирования таких заказников сформулированы специалистами (Гребенников, Гребенников, 1980; Иванов, Самохвалова, 1993; Ченикалова, 2000; Богатырев, 2001), но в практическом отношении к настоящему времени достигнуто очень мало. Основой для такого энтомологического заказника может быть территория Нагатинской поймы или хотя бы ее часть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А. В., Стратан В. С., Патрашку В. И. 1991. Шмели и шмели-кукушки (*Hymenoptera, Apoidea: Bombus Latr., Psithyrus Lep.*) фауны Республики Молдова. — Изв. АН Республики Молдова. Биол. и хим. науки. Т. 3, с. 33—37.
- Афиногенов А. З., Золотарева С. Н. 1988. Опыление растений шмелями в Западной Сибири. — М., с. 216—218.
- Бейтелар К. 1997. Влияние температуры, регуляторов роста и шмелей на урожай баклажанов. — Мир теплиц. № 2, с. 25—26.
- Березин М. В., Бейко В. Б. 1998. Видовое разнообразие шмелей (*Hymenoptera, Apidae, Bombus*) большого города (на примере Москвы). — В кн.: Научные исследования в зоологических парках. — М., с. 89—102.
- Блинников В. И., Наумкин В. П., Куликов Н. И. 2000. Шмели Орловской области. — В кн.: Сборник научных трудов по пчеловодству. Вып. 4, с. 1001—1115.
- Богатырев Н. Р. 2001. Прикладная экология шмелей. — Новосибирск: Изд-во гор. Центра развития образования. — 158 с.
- Гребенников В. С., Гребенников С. В. 1980. Усиление популяций шмелей в условиях пригорода. — Пчеловодство, № 4, с. 21—22.
- Гребенников В. С., Гребенников С. В. 1983. Использование шмелей на опылении клевера красного. — В кн.: Использование пчел для опыления сельскохозяйственных культур. — М.: Колос, с. 75—79.
- Гребенников В. С. 1984. Шмели — опылители клевера. — М.: Россельхозиздат. — 62 с.
- Дожиков А. А. 1990. Данные по экологии гнездования шмелей. — Экология, № 2, с. 82—84.
- Ефремова З. А. 1988. Влияние антропогенных факторов на современное обилие шмелей и их зонально-ландшафтное распределение в Поволжье. — В кн.: Охрана животных в Среднем Поволжье. — Куйбышев, с. 37—42.
- Ефремова З. А. 1989. Современное население шмелей разных ландшафтных зон Поволжья. — В кн.: Защита растений и охрана природы в Татарской АССР. Т. 4, с. 85—86.
- Зарецкий Н. Н., Пужевич М. С. 1996. Пчелы и шмели в теплицах. — Пчеловодство, № 2, с. 23—25.
- Иванов Е. С., Самохвалова Т. П. 1993. Охрана опылителей в Рязанской области. — Пчеловодство, № 9, с. 36—37.
- Комиссар А. Д., Миронов Г. А. 1993. Новая биотехнология разведения шмелей. — Пчеловодство, № 5—6, с. 42—43.
- Мадебейкин И. Н. 1997. Использование шмелей для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. — В кн.: Аграрный сектор экономики Чувашии в XX веке: преобразования, проблемы и перспективы. — Чебоксары, с. 197—202.
- Мадебейкин И. Н. 1998. Шмели-кукушки. — Пчеловодство, № 2, с. 61.
- Мадебейкин И. Н. 2002. Шмели в семеноводстве клевера красного. — Пчеловодство, № 2, с. 56—57.
- Мельцер Н. А., Соромотин А. В. 1998. Шмели (*Insecta, Hymenoptera*) как индикаторы антропогенной нагрузки в городах юга Западной Сибири. — Экология, № 5, с. 414—416.
- Степанова Р. К. 1999. К фауне шмелей (*Bombus, Apidae*) Башкортостана. — В кн.: Фауна и флора Республики Башкортостан: проблемы их изучения и охраны. — Уфа, с. 61—65.
- Стойко Т. Г., Аникин С. Н. 2001. Программа по изучению шмелей и шмелей-кукушек: методические рекомендации. — Пенза: Пензенский гос. пед. ун-в. — 24 с.

Ченикалова Е. В. 2000. Система биотехнических мероприятий по охране природных опылителей сельскохозяйственных культур. — В кн.: Защита и карантин растений. — Ставрополь, с. 39—44.

Ченикалова Е. В. 2003. Шмели Ставрополя и их охрана. — В кн.: Заповедное дело России: принципы, проблемы, приоритеты. Материалы Международной научной конференции, посвященной 75-летию Жигулевского государственного природного заповедника им. Спрыгина. Жигулевск, Бахилова Поляна, 4—8 сентября 2002 г. Бахилова Поляна. Т. 2, с. 405—406.

Berezin M. V., Beiko V. B., Berezina N. V. 1995. Bumble bees of the Moscow region. — Entomol. Mont. Mag., v. 131, N 11, p. 259—268.

Dag A., Kammer Y. 2001. Comparison between the effectiveness of honey bee (*Apis mellifera*) and bumble bee (*Bombus terrestris*) as pollinators of greenhouse sweet pepper. — Am. Bee J., v. 141, N 6, p. 447—448.

Kosior A., Nosek A. 1987. Species composition and number of bumble bees *Bombus* Latr. in the areas influenced by emission from non-ferrous metalworks in the Silesian Upland. — Zakład ochrony przyrody i zasobów naturalnych polskiej Akademii Nauk, Studia Natural, v. 31, N 3, p. 81—89.

Navez B. 1990. Pollinisation par bourdons. — Fruits Legumes, v. 79, p. 48—51.

Stubbs C. S., Drummond F. A. 2001. *Bombus impatiens* (Hymenoptera: Apidae): an alternative to *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) for lowbush blueberry pollination. — J. Econ. Entomol., v. 94, N 3, p. 609—616.

Weber D. 1990. Praktische Erfahrungen bei der Aufzucht von Hummelvolkern für Bestäubungszwecke in geschlossenen Räumen. — Wiss. Z. Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg. Math.-Naturwiss. Reihe, Bd. 39, N 5, s. 3—7.

**ФОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЛИШАЙНИКОВ,
ОБИТАЮЩИХ НА СТВОЛАХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ,
В ВОЛЖСКО-КАМСКОМ, КЕРЖЕНСКОМ
И ПЕЧОРО-ИЛЫЧСКОМ ЗАПОВЕДНИКАХ**

А. В. Пчелкин, А. А. Рудкова

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, igcc@comcor.ru

Реферат. С 1978 г. Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН проводит базовые лихенологические обследования состояния сообществ стволовых лишайников в заповедниках стран СНГ. В настоящее время проводятся как повторные обследования, так и обследования новых территорий. При этом изучается узкий слой форофитов — сосны *Pinus sylvestris* L. в спелых и приспевающих древостоях. При оценке состояния сообществ лишайников используется метод линейных пересечений. Обследование эпифитных лишайников в Волжско-Камском заповеднике обнаружило 12 видов. Влияния выбросов автотранспорта от локальной автодороги на эти сообщества не выявлено, т. е. они являются объектом фонового мониторинга. Результаты, полученные в Волжско-Камском и Керженском заповедниках обнаружили весьма большое сходство. Близкими оказались число обнаруженных видов (соответственно 12 и 11) и линейное проективное покрытие. Видовой состав также оказался весьма сходным. Идентичным оказался и доминантный состав (*Chaenotheca ferruginea*, *Hypogymnia physodes*, *Hypocenomyce scalaris*). Лихенологическое обследование Якшинского участка Печоро-Илычского заповедника было проведено в 1984 и 2001 гг. Сравнение показало отсутствие существенных изменений видового состава и количественных характеристик сообщества стволовых лишайников-эпифитов.

Ключевые слова. Стволовые лишайники, фоновый мониторинг, сосна обыкновенная, заповедники.

**A BACKGROUND MONITORING OF EPIPHYTIC LICHEN
COMMUNITIES IN THE KERGENSKY, VOLGSKO-KAMSKY
AND PECHORA-ILYCH RESERVES**

A. V. Pchelkin, A. A. Rudkova

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str.,
107258 Moscow, Russia, igcc@comcor.ru

Abstract. Since 1978 the Institute of Global Climate and Ecology carries out the basic surveys of a state of communities of trunk epiphytic lichens in na-

ture reserves over the USSR (currently CIS) territory. At present, the repeated surveys as well as surveys of new territories are being performed. A narrow group of trees were examined, namely, Scots pines *Pinus sylvestris* L. in the ripe and semi-ripe stands. A linear intersection method was employed in the assessment of a state of epiphytic lichen communities. A survey of epiphytic lichens in the Volgsko-Kamsky nature reserve yielded 12 species. An influence of transport emissions from the local road has not been detected, therefore, the lichen communities can be used for background monitoring purposes. The results obtained at Volgsko-Kamsky and Kergensky reserves revealed great similarity, both with respect to number of species (12 and 11, respectively) and to the linear cover. Species composition also occurred very close, as well as the dominants (*Chaenotheca ferruginea*, *Hypogymnia physodes*, *Hypocenomyce scalaris*). A comparison of the results of lichenological surveys carried out at Pechora-Ilych nature reserve in 1984 and 2001 have not shown any significant changes in quantitative characteristics of the epiphytic lichen communities.

Keywords. Trunk epiphytes, background monitoring, Scots pine, nature reserves.

Введение

В 1978—2003 гг. экологической экспедицией Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН проводились базовое лихенологическое обследование и оценка эталонных территорий стран СНГ, находящихся в условиях фоновой загрязненности атмосферы регионального/континентального масштабов. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований показал, что обследование состояния сообществ эпифитных лишайников на эталонных территориях, в качестве которых оптимально использовать заповедники России, целесообразно периодически повторять, что поможет установить тенденции изменения основных лихенологических показателей во времени, а также выявить территориальные антропогенные аномалии. Состояние сообществ — лихенологический компонент системы мониторинга состояния природной среды регионального и континентального масштабов. Целью мониторинга было, в частности, получение информации о состоянии сообществ стволовых лишайников для выявления: а) долгосрочных изменений этого состояния и б) антропогенных аномалий в состоянии этих сообществ в тех же типах леса, но в условиях предположительного загрязнения атмосферы и/или изменения климата.

На территории России было обследовано 16 эталонных территорий. Это государственные заповедники: Кандалакшский, Печоро-Илычский, Приокско-Тerrasный, Центрально-Черноземный, Кавказский, Северо-Осетинский, Астраханский, Алтайский, Саяно-Шушенский, Баргузинский, Сохондинский, Олекминский, Кроноцкий, Сихотэ-Алиньский, Ку-

рильский, а также заказник „Малые Курилы”. При этом использовался накопленный лишенологами позитивный опыт ряда региональных лишенологических исследований (Бязров, 2002; Магомедова, 1984; Макрый, 1990; Мартин, 1982; Пчелкин, 1999; Седельникова, 1985; Трасс, 1986). Европейская часть России в этом списке представлена явно недостаточно. Поэтому в 2002 г. было проведено лишенологическое исследование Волжско-Камского, а в 2003 г. — Керженского заповедников. Для выявления аномалий в состоянии сообщества эпифитных лишайников обследуется экополигон определенной флористической провинции. Использование информации, полученной при базовом обследовании эталонной территории, зависит от особенностей обследуемого экополигона. Если это обширная территория, сравнимая по размерам и лесотипологическим характеристикам с эталонной, то для сравнения по определенной породе деревьев-форофитов можно использовать значения показателей встречаемости и варьирования в целом по экополигону и эталонной территории. Такое осреднение в значительной степени согласуется с изменением изучаемых показателей, связанное с типом леса, где представлена данная порода, и с ландшафтными различиями. Наиболее статистически достоверные результаты можно получить, если проводить лишенологическое обследование возможно более „узкого” слоя, т. е. на одной древесной породе, на одной высоте, в одинаковых или максимально сходных типах леса. Поэтому при проведении лишенометрических съемок в 2001—2003 гг. в Печоро-Илычском, Волжско-Камском и Керженском заповедниках в качестве форофита была выбрана лишь одна древесная порода — сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. Особый интерес представляют повторные лишенометрические съемки и их сравнение с предыдущими. Вследствие известных сложностей с финансированием научных исследований в последние годы повторные обследования, составляющие суть методологии мониторинга, не проводились. Лишь однажды, в 2001 г., удалось провести повторное обследование экополигона „Якша” в Печоро-Илычском заповеднике. Впервые этот экополигон изучался в 1984 г. в ходе базового, гораздо более широкого лишенологического обследования всей территории заповедника. В этой работе проводится сравнительная оценка состояния сообществ эпифитных лишайников на сосне обыкновенной *Pinus sylvestris* L. по результатам этих двух обследований на экополигоне „Якша”. Данная работа посвящена сравнительным исследованиям в Печоро-Илычском заповеднике 1984 и 2001 гг., а также лишенологическим исследованиям в Волжско-Камском (2002 г.) и Керженском (2003 г.) заповедниках.

Материалы и методы

Полевые лишенологические обследования проводились методом линейных пересечений (Инсаров, Пчелкин, 1983) в основных типах леса на одной из наиболее распространенных породах деревьев — на сосне обыкновенной.

новенной *Pinus sylvestris* L. На каждой эталонной территории для каждого обследованного типа леса изучалось несколько пробных площадей, выбираемых случайным образом. На каждой пробной площади также случайным образом выбиралось несколько деревьев для обследования. При этом не использовались молодые или же перестойные деревья, наклонно растущие деревья, а также деревья с видимыми механическими повреждениями. Выбор осуществлялся без учета предварительной информации об обилии лишайников на стволах деревьев. Талломы лишайников изучались на пересечении с мерной лентой с миллиметровыми делениями, наложенной горизонтально на ствол дерева на определенной высоте (обычно — 1,5 м). Лента накладывалась в направлении по часовой стрелке, если смотреть сверху. Начало ленты — нулевая отметка — ориентировалось на север. Описывался видовой состав лишайников, а также оценивались основные количественные показатели — встречаемость видов и их линейное проективное покрытие в относительных единицах.

Встречаемость оценивалась как доля деревьев, на которых встретился данный вид при обследовании. Линейное проективное покрытие (далее покрытие) оценивалось как среднее значение отношения суммы длин частей горизонтального сечения боковой поверхности дерева на высоте 1,5 м, принадлежащих талломам лишайников данного вида, к длине всего горизонтального сечения (рис. 1). Эти количественные показатели можно оценивать не только для отдельных видов, но и для определенных их групп, а также для всех видов лишайников вместе. В последнем случае соответствующие показатели называются общей встречаемостью и общим покрытием. Удобнее всего эти величины (встречаемость и покрытие) приводить к процентам, умножая на 100 (см. рис. 1).

Такие обследования были проведены однократно для всех упомянутых выше эталонных территорий.

В природных условиях можно часто наблюдать, что два разных вида в силу особенностей их образа жизни вступают в конкуренцию, для того чтобы обеспечить себя оптимальным субстратом. В ходе развития виды, рост которых происходит недостаточно быстро, вытесняются другими,

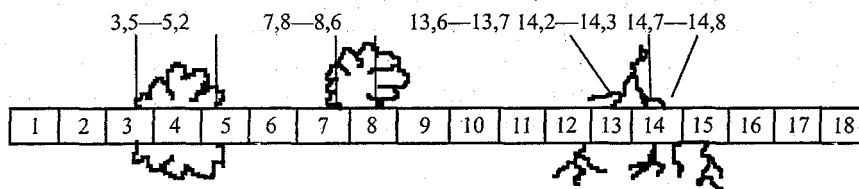


Рис. 1. Схематическое изображение: мерная лента с миллиметровыми делениями (на рисунке указаны лишь сантиметровые) и талломы лишайников; при обследовании регистрируются начало и конец пересечения талломов с верхним краем ленты.

если только они не относятся к теневыносливым формам (как, например, *Lepraria incana*). Этот процесс, при котором часть видов постепенно исчезает из их первоначального набора, проходит через стадию развития переходных сообществ (синузий) и заканчивается климаксовым сообществом. Например, климаксовым эпифитным лишайниковым сообществом для дубрав Западной Европы считается ассоциация *Lobaria pulmonaria*. Следует отметить, что климаксовые эпифитные лишайниковые сообщества могут существовать только на очень старых деревьях. По мере роста дерева происходит сукцессионная смена, которую можно представить в виде упрощенной схемы:

накипные виды (типа *Buellia*, *Graphis*) → мелколистоватые виды лишайников (типа *Parmeliopsis*) → среднелистоватые виды лишайников (типа *Parmelia*) → крупнолистоватые виды (типа *Lobaria*) + кустистые виды.

Отсюда совершенно очевидно, что для целей фонового мониторинга при изучении изменения биоразнообразия лишайниковых популяций под действием поллютантов в климаксовых сообществах можно использовать метод постоянных пробных площадей с постоянными растениями-форопитами. При отсутствии в данном районе климаксовых лишайниковых сообществ предпочтительней использовать метод переменных пробных площадок.

При повторных лихенометрических съемках деревьев, удовлетворяющие модельным параметрам, выбирались случайным образом на переменных пробных площадях, что позволило избежать влияния сукцессии.

Печоро-Илычский заповедник. Печоро-Илычский заповедник расположен в Республике Коми в предгорьях северного Урала. Его естественными границами на севере, западе и юге являются соответственно реки Кожим, Илыч и Верхняя Печора, а на востоке — Главный Уральский хребет. Экополигон „Якша” находится на территории Якшинского лесничества. Для него характерны светлые лишайниковые и зеленомошно-лишайниковые сосновые боры, а также зеленомошные боры на более увлажненных участках (Соколов, Сыроечковский, 1990). В этих лесах сосна обыкновенная образует довольно однородные сомкнутые древостои, где она представлена практически всеми возрастными группами. При долгосрочном мониторинге это минимизирует влияние эндогенных факторов, в частности возрастных изменений в древостое, на состояние сообществ стволовых лишайников.

Географическое расположение, удаленность от существенных источников загрязнения атмосферы, типичность лесоэкологических условий, а также наличие местного природоохранного режима позволяют использовать его в качестве регионального фонового экополигона для мониторинга по биологическим показателям состояния приземного слоя атмосферы в предгорьях северного Урала. Обследование стволовых лишайников про-

водилось в 1984 и 2001 гг. на сосне обыкновенной *Pinus sylvestris* L. методом линейных пересечений на переменных пробных площадях.

Волжско-Камский заповедник. Целевое обследование состояния сообществ стволовых лишайников-эпифитов проводилось в Волжско-Камском государственном заповеднике экспедиционным отрядом ИГКЭ в октябре 2002 г. Волжско-Камский заповедник, организованный в 1960 г., расположен на левобережье Волги и состоит из двух обособленных участков: Раифского и Сараловского, удаленных друг от друга на 100 км. Раифский участок находится в 30 км к западу от Казани, его площадь составляет 3864 га; Сараловский (площадью 4170 га) расположен на 60 км южнее, в устье Камы. Волжско-Камский заповедник расположен на стыке природных зон — южной тайги и лесостепи.

В качестве экополигона для обследования были выбраны сложные спелые сосняки, расположенные в центральных кварталах Раифского участка. При этом первая группа проб была выбрана в кварталах вдоль шоссе, а вторая непосредственно прилегала к кварталам из первой группы, находясь дальше от шоссе. В кварталах вдоль шоссе пробные площади выбирались не ближе чем в 100 м от шоссе. На каждой из пробных площадей было случайным образом выбрано по 5 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) высотой 25—30 м. Оценке подлежали видовой состав, встречаемость P (%) и линейное проективное покрытие $Cover$ (%) на мерной ленте, наложенной на дерево на высоте 1,5 м от комля. Таким образом, было обследовано 95 деревьев на 19 пробных площадях.

Цели данного лишайнологического обследования состояли в том, чтобы:

- провести анализ возможных различий показателей состояния стволовых сообществ лишайников-эпифитов в спелых сложных сосняках (сосново-еловых и сосново-березово-еловых), расположенных в кварталах 1-й и 2-й групп; это различие потенциально могло иметь место вследствие влияния выбросов автотранспортных средств;

- при отсутствии таких различий дать общую характеристику состояния стволовых сообществ лишайников-эпифитов в рассматриваемых спелых сложных сосняках (сосняках с примесью ели, березы, клена, липы, дуба, осины); средние показатели форофита (сосны) для использования их характеристик как регионального эталона при выявлении локальных антропогенных аномалий.

Керженский заповедник (площадью 46 936 га) организован в 1993 г., а в 2002 г. получил статус биосферного. Он расположен на левом берегу реки Керженец — притока Волги, в Борском и Семеновском районах Нижегородской области. Для флоры заповедника характерно сочетание таежных и широколиственных лесов. Кроме того, на его территории имеются участки степной растительности.

Стволовые эпифитные лишайники в Керженском заповеднике изучались в 2003 г. в спелых сосняках, расположенных на территории заповедника. На каждой из пробных площадей было случайным образом выбрано по 5 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Таким образом, было обследовано 119 деревьев на 24 пробных площадях в сосняках с елью черничных, зеленомошных, зеленомошно-черничных, бруснично-зеленомошных и зеленомошно-лишайниковых.

Результаты

Первичные данные обследования Печоро-Илычского заповедника 1984 г. опубликованы в работе (Инсаров, Пчелкин, 1986). В 1984 и 2001 гг. было обследовано 27 и 89 деревьев соответственно. Длина окружности этих деревьев составляла около 100 см. На пересечении с мерной лентой, наложенной на высоте 1,5 м, было обнаружено 19 и 18 видов соответственно. Все 24 вида стволовых лишайников-эпифитов, встретившихся при обоих обследованиях, приведены в табл. 1.

Метод линейных пересечений позволяет проводить измерения лишайников большинства жизненных форм и экологических групп. Исключение составляют эпифлеоидные виды (а в случае эпилитных лишайников — эндолитные формы). Определенные трудности возникают при исследовании лишайников с отсутствующими или исчезающими талломами. Поэтому виды *Lecanora piniperda* (Boist.) Koerb., *Lecanora subintricata* (Nyl.) Th. Fr., *Lecanora phaeostigma* (Koerb.) Almb., *Lecidea erythrophaea* Flörke, *Lecidea tornensis* Nyl., *Lecidea turgidula* Fr. были исключены из анализа, поскольку их талломы часто плохо различимы или же просто отсутствуют. Две разновидности *Bryoria fremontii* (№ 1 и 2 в табл. 1), которые различались при первом обследовании, были объединены при втором, поскольку их различия весьма условны.

Результаты сравнительной оценки состояния сообществ стволовых лишайников-эпифитов приведены в табл. 2. В этой таблице приведена информация о встречаемости (P , %) и линейном проективном покрытии *Cover* видов эпифитов. Приводятся также количественные характеристики изменчивости этих показателей, а именно: нижняя $P_{\min}$ и верхняя $P_{\max}$ доверительные границы для встречаемости (доверительная вероятность — 0,95) и ошибка *St. er.* оценки линейного проективного покрытия.

В Волжско-Камском заповеднике при обследовании на пересечении с мерной лентой было обнаружено 12 видов стволовых лишайников-эпифитов (см. табл. 1), один из которых удалось идентифицировать лишь до рода.

В табл. 3 количественные показатели приведены по отдельности для совокупности 35 и 60 обследованных деревьев соответственно из 1-й и 2-й групп пробных площадей. В табл. 4 приведены данные в целом по Волжско-Камскому заповеднику.

Таблица 1

Виды стволовых лишайников, которые встретились на стволах сосны обыкновенной на экополигоне „Якша” (1) (Россия, Печоро-Ильчский заповедник, Республика Коми, предгорья северного Урала) при обследованиях 1984 и 2001 гг., в Волжско-Камском (2) и Керженском (3) заповедниках

Виды лишайников	Заповедники		
	1	2	3
1а. <i>Bryoria fremontii</i> (Tuck.) Brodo et D.Hawksw. v. <i>erikssonii</i> Du Rietz	+	-	-
1б. <i>Bryoria fremontii</i> (Tuck.) Brodo et D.Hawksw. v. <i>olivacea</i> (Raes.) Magn.	+	-	-
2. <i>Bryoria furcellata</i> (Fr.) Brodo et D.Hawksw.	+	-	-
3. <i>Bryoria fuscescens</i> (Gyelnik) Brodo et D.Hawksw.	+	-	-
4. <i>Bryoria lanestris</i> (Ach.) Brodo et D.Hawksw.	+	-	-
5. <i>Bryoria simplicior</i> (Vain.) Brodo et D.Hawksw.	+	-	-
6. <i>Chaenotheca chrysocephala</i> (Turn.ex Ach.) Th.Fr.	-	+	-
7. <i>Chaenotheca ferruginea</i> (Turn.ex Sm.) Mig.	-	+	+
8. <i>Cladonia coniocraea</i> Flörke Spreng.	-	+	-
9. <i>Cladonia macilenta</i> Hoffm.	-	-	+
10. <i>Cladonia</i> sp.	-	+	-
11. <i>Evernia mesomorpha</i> Nyl.	-	+	+
12. <i>Evernia divaricata</i> (L.) Ach.	-	+	-
13. <i>Vulpicida pinastri</i> (Scop.) Mattson & Lai	+	+	+
14. <i>Hypocenomyce scalaris</i> (Ach.ex Lilj.) Choisy	+	+	+
15. <i>Hypogymnia bitteri</i> (Lyngb) Abth	+	-	-

16. *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.
17. *Hypogymnia vittata* (Ach.) Par.
18. *Lecanora piniperda* (Boist.) Koerb.
19. *Lecanora subintricata* (Nyl.) Th.Fr.
20. *Lecanora phaeostigma* (Koerb.) Almb.
21. *Lecidea erythrophaea* Floerke
22. *Lecidea tornoensis* Nyl.
23. *Lecidea turgidula* Fr.
24. *Mycoblastus sanguinarius* (L.) Norm.
25. *Ochrolechia arborea* (Ljubitz.) Almb.
26. *Parmelia septentrionalis* (Lyng.) Ahti
27. *Parmeliopsis ambigua* (Wulf.) Nyl.
28. *Parmeliopsis hyperopta* (Ach.) Arnold
29. *Imshaugia aleurites* (Ach.) Nyl.
30. *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf.
31. *Scoliosporum chlorococcum* (Graewe ex Stenh.) Vezda
32. *Usnea filipendula* Stirt
33. *Usnea hirta* (L.) Wigg.

Bcero

+	+	+
+	+	+
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
+	+	+
-	-	-
+	+	+
-	-	-
-	-	-
+	+	+
-	-	-
+	+	+
24	12	11

Таблица 2

Оценки показателей встречаемости и линейного проективного покрытия
для стволовых лишайников, встретившихся при обследованиях
1984 и 2000 гг. на экополигоне „Якша”
(Печоро-Илычский заповедник, Республика Коми,
предгорья северного Урала) на сосне обыкновенной

Вид	1984 г.					2001 г.				
	$P_{\min}$	P	$P_{\max}$	Cover	St.er.	$P_{\min}$	P	$P_{\max}$	Cover	St.er.
В целом	83,0	96,3	100,0	7,1	3,5	95,9	100,0	100,0	8,0	0,6
<i>B. fremontii</i>	1,0	7,4	22,0	0,1	0,1	—	—	—	—	—
<i>B. fremontii</i>	5,0	14,8	31,0	0,0	0,0	16,9	24,7	34,6	0,3	0,1
<i>B. furcellata</i>	38,0	55,6	72,0	0,8	0,4	28,8	38,2	48,6	0,8	0,2
<i>B. fuscescens</i>	12,0	25,9	44,0	1,6	2,0	44,7	55,1	65,0	1,7	0,5
<i>B. lanestris</i>	5,0	14,8	31,0	0,3	0,2	7,9	13,5	22,1	0,3	0,1
<i>B. simplicior</i>	1,0	7,4	22,0	0,0	0,0	—	—	—	—	—
<i>V. pinastri</i>	0,0	3,7	17,0	0,0	0,0	0,2	1,1	6,1	0,0	0,0
<i>H. scalaris</i>	0,0	3,7	17,0	0,0	0,0	0,6	2,2	7,8	0,0	0,0
<i>H. bitteri</i>	—	—	—	—	—	0,2	1,1	6,1	0,0	0,0
<i>H. physodes</i>	12,0	25,9	44,0	0,5	0,3	16,0	23,6	33,4	0,7	0,3
<i>H. vittata</i>	—	—	—	—	—	0,2	1,1	6,1	0,0	0,0
<i>M. sanguinarius</i>	—	—	—	—	—	1,8	4,5	11,0	0,0	0,0
<i>O. arborea</i>	1,0	7,4	22,0	0,0	0,0	3,1	6,7	13,9	0,0	0,0
<i>P. septentrionalis</i>	—	—	—	—	—	0,2	1,1	6,1	0,0	0,0
<i>P. ambigua</i>	10,0	22,2	40,0	0,1	0,1	19,8	28,1	38,2	0,1	0,0
<i>P. hyperopta</i>	0,0	3,7	17,0	0,1	0,1	1,2	3,4	9,4	0,0	0,0
<i>P. aleurites</i>	78,0	92,6	99,0	3,4	1,0	93,9	98,8	99,8	3,9	0,4
<i>U. filipendula</i>	—	—	—	—	—	0,2	1,1	6,1	0,0	0,0
<i>U. hirta</i>	0,0	3,7	17,0	0,0	0,0	—	—	—	—	—

Примечание. Здесь и в табл. 3—5 P — встречаемость, %; $P_{\min}$ и $P_{\max}$ — ее нижняя и верхняя доверительные границы соответственно; Cover — линейное проективное покрытие, %; St. er. — его ошибка, %.

Таблица 3

Количественные показатели состояния сообществ эпифитных лишайников, измеренные методом линейных пересечений, для изученных двух групп деревьев в Волжско-Камском заповеднике

Вид	Вблизи шоссе					На удалении от шоссе				
	$P_{\min}$	P	$P_{\max}$	Cover	St.er.	$P_{\min}$	P	$P_{\max}$	Cover	St.er.
В целом	91,0	100,0	100,0	16,9	2,3	94,0	100,0	100,0	18,9	2,2
<i>Chaenotheca chrysocephala</i>	0,0	2,9	13,0	0,2	0,2	—	—	—	—	—
<i>Chaenotheca ferruginea</i>	18,0	31,4	47,0	4,1	1,3	31,6	43,3	55,9	5,6	1,6
<i>Cladonia coniocraea</i>	0,0	2,9	13,0	0,1	0,1	—	—	—	—	—
<i>Cladonia sp.</i>	0,0	2,9	13,0	0,2	0,2	0,3	1,7	8,9	0,1	0,1
<i>Evernia mesomorpha</i>	2,0	8,6	21,0	0,1	0,1	1,7	5,0	13,7	0,1	0,1
<i>Evernia divaricata</i>	0,0	2,9	13,0	0,0	0,0	1,7	5,0	13,7	0,2	0,1
<i>Hypocnemomyces scalaris</i>	56,0	71,4	84,0	10,4	1,9	50,7	63,3	74,4	9,6	2,3
<i>Hypogymnia physodes</i>	33,0	48,6	64,0	1,8	0,9	42,5	55,0	66,9	3,3	1,0
<i>Parmeliopsis ambigua</i>	0,0	2,9	13,0	0,0	0,0	—	—	—	—	—
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	—	—	—	—	—	0,3	1,7	8,9	0,0	0,0
<i>Usnea hirta</i>	—	—	—	—	—	0,3	1,7	8,9	0,0	0,0
<i>Vulpicida pinastri</i>	—	—	—	—	—	0,3	1,7	8,9	0,0	0,0

Наличие нулевых значений (0) покрытия и ошибки в данной и следующей таблице возникли вследствие округления до десятых.

В Керженском заповеднике при обследовании на пересечении с мерной лентой было обнаружено 11 видов стволовых лишайников-эпифитов (см. табл. 1). Измеренные значения и результаты таксономического определения были впоследствии внесены в базу данных, которая ведется в ИГКЭ. Была проведена первичная статистическая обработка этих данных. Ее результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Количественные показатели состояния сообществ эпифитных лишайников, измеренные методом линейных пересечений, для Керженского заповедника

Вид	$P_{\min}$	P	$P_{\max}$	Cover	St.er.
В целом	96,9	100,0	100,0	14,7	1,3
<i>Chaenotheca ferruginea</i>	6,5	10,9	17,8	0,6	0,2
<i>Cladonia macilenta</i>	0,1	0,8	4,6	0,1	0,1
<i>Evernia mesomorpha</i>	17,5	24,4	32,8	0,6	0,2
<i>Hypogymnia physodes</i>	85,2	91,6	95,4	10,5	1,3
<i>Hypocenomyce scalaris</i>	11,2	16,8	24,5	1,3	0,4
<i>Imshaugia aleurites</i>	5,2	9,2	15,8	0,3	0,2
<i>Parmeliopsis ambigua</i>	0,9	2,5	7,2	0,0	0,0
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	9,8	15,1	22,6	0,8	0,3
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	0,1	0,8	4,6	0,0	0,0
<i>Usnea hirta</i>	12,5	18,5	26,4	0,4	0,1
<i>Vulpicida pinastri</i>	0,1	0,8	4,6	0,0	0,0

Обсуждение

Волжско-Камский заповедник. Флора лишайников Раифского участка до данным предварительного исследования насчитывает 111 видов (Урбанавичус, Урбанавичене, 2001). Во время наших количественных исследований на сосне отмечено 12 видов. Как видно из табл. 3, никаких достоверных различий в показателях состояния доминантных видов *Chaenotheca ferruginea*, *Hypocenomyce scalaris* и *Hypogymnia physodes*, в значениях встречаемости и линейного проективного покрытия в целом, а также в показателях встречаемости редко встречаемых видов, встретившихся в обеих группах, не имеется. Что касается остальных редко встречаемых видов, то их наличие или же отсутствие в материалах обследования той или иной группы с высокой вероятностью имеет случайный характер и не может быть основанием для констатации достоверных различий.

Ранее градиентные исследования, проведенные в парках Москвы вдоль по трансектам, перпендикулярным МКАД-московской кольцевой автодороге, показали высокую фильтрующую способность лесов (Пчелкин, 1999). На расстоянии в 250—300 м от МКАД влияние такого мощного источника выбросов автотранспорта, как МКАД, при существующем фоновом уровне загрязнения уже практически не ощущалось.

Из этого следует, что эпифитные лишайники на деревьях 2-й группы, обследованных в ВКГЗ, заведомо не ощущают на себе влияния выбросов автотранспорта от локальной автодороги (шоссе). Показанное выше отсутствие различий между 1-й и 2-й группой деревьев в состоянии сообществ лишайников-эпифитов — аргумент в пользу того, что влияние выбросов автотранспорта на эпифитные лишайники на деревьях 1-й группы в настоящее время практически отсутствует.

Отсутствие различий позволяет объединить обе группы проб, всю обследованную территорию рассматривать как достаточно однородный экополигон, а количественные характеристики состояния стволовых лишайников-эпифитов, рассчитанные для этого экополигона (сложные спелые сосняки — сосново-еловые, сосново-березовые (с примесью клена, дуба, липы и др. пород); средние показатели форофита (сосны): длина окружности на высоте 1,5 м от комля — 100—150 см, высота деревьев 23—30 м) рассматривать как региональные эталонные для данного типа леса. Они могут в дальнейшем использоваться для выявления локальных антропогенных аномалий в пределах данного региона (Пчелкин, 2001). В табл. 5 приведены такие обобщенные характеристики.

Таблица 5

Количественные показатели состояния сообществ эпифитных лишайников, измеренные методом линейных пересечений, для Волжско-Камского заповедника

Вид	$P_{\min}$	P	$P_{\max}$	Cover	St.er.
В целом	96,1	100,0	100,0	18,2	1,6
<i>Chaenotheca chrysocephala</i>	0,2	1,1	5,7	0,1	0,1
<i>Chaenotheca ferruginea</i>	29,8	38,9	49,0	5,0	1,2
<i>Cladonia coniocraea</i>	0,2	1,1	5,7	0,0	0,0
<i>Cladonia sp.</i>	0,6	2,1	7,4	0,2	0,1
<i>Evernia mesomorpha</i>	2,9	6,3	13,1	0,1	0,1
<i>Evernia divaricata</i>	1,6	4,2	10,3	0,1	0,1
<i>Hypocenomyce scalaris</i>	56,3	66,3	75,0	9,9	1,5
<i>Hypogymnia physodes</i>	42,7	52,6	62,4	2,7	0,7
<i>Parmeliopsis ambigua</i>	0,2	1,1	5,7	0,0	0,0
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>	0,2	1,1	5,7	0,0	0,0
<i>Usnea hirta</i>	0,2	1,1	5,7	0,0	0,0
<i>Vulpicida pinastri</i>	0,2	1,1	5,7	0,0	0,0

Керженский заповедник. В настоящее время лишенофлору Керженского заповедника можно считать сравнительно хорошо изученной. Она насчитывает 205 видов лишайников всех экологических групп (Урбанавичене, Урбанавичус, 2001). Все обнаруженные нами виды являются широко распространенными и часто встречающимися. Качественная оценка встречаемости эпифитных лишайников, отмеченных ранее на сосне (Урбанавичене, Урбанавичус, 2001), совпадает с результатами настоящих количественных исследований.

Сравнение количественных результатов, полученных в Керженском заповеднике, с таковыми из Волжско-Камского заповедника показало весьма большое сходство как по числу обнаруженных видов (11 и 12 видов соответственно), так и по значениям проективного покрытия ($14,7 \pm 1,3$ и $18,2 \pm 1,6$ % соответственно). Видовой состав также оказался весьма сходным. Сходным оказался и доминантный состав (*Chaenotheca ferruginea*, *Hypogymnia physodes*, *Hypocenomyce scalaris*). В то же время в Керженском заповеднике гораздо чаще встречается *Usnea hirta*, а во время наших количественных сборов в Волжско-Камском заповеднике вид *Pseudevernia furfuracea* вообще не был отмечен, хотя в заповеднике он произрастает.

Согласно шкале полеотолерантности (Трасс, 1985), тип местообитания эпифитных лишайников можно характеризовать как естественный или антропогенно слабоизмененный. Один из доминирующих видов (*Imshaugia aleurites*) относится ко 2-му классу полеотолерантности, остальные виды — к 4—6-му классам полеотолерантности, за исключением *Scoliciosporum chlorococcum*, относящегося к 10-му классу полеотолерантности. При усилении антропогенного тренда следует ожидать уменьшения количественных показателей (встречаемости и проективного покрытия), в первую очередь *Imshaugia aleurites*.

Печоро-Илычский заповедник. Во время сравнительных исследований было обнаружено, что по сравнению с 1984 г. в 2001 г. покрытие доминантных видов (т. е. имеющих покрытие более 0,1 %) не изменилось или незначительно увеличилось: *Bryoria fremontii* (от 0,1 до 0,3 %), *Bryoria furcellata* (от 0,8 до 0,8 %), *Bryoria fuscescens* (от 1,6 до 1,7 %), *Bryoria lanestris* (от 0,3 до 0,3 %), *Hypogymnia physodes* (от 0,5 до 0,7 %), *Imshaugia aleurites* (от 3,4 до 3,9 %). Эти виды являются вполне обычными для бореальных лесов северного полушария. Общее покрытие и число встреченных видов изменились аналогично: от 7,1 до 8,0 % и от 13 до 16 % соответственно. Таким образом, судя по показателям состояния сообществ стволовых лишайников на экополигоне „Якша” состояние приземного слоя атмосферы за период 1984—2001 гг. не ухудшилось.

Заключение

Проведено базовое лихенологическое обследование состояния сообществ стволовых лишайников в Волжско-Камском, Керженском и Печоро-Илычском заповедниках. Изучен узкий слой форофитов — сосны *Pinus sylvestris* L. — в спелых и приспевающих древостоях методом линейных пересечений. Обследование эпифитных лишайников на сосне обыкновенной в Волжско-Камском заповеднике выявило 12 видов. Показано, что они не испытывают влияния выбросов автотранспорта от локальной автодороги, т. е. являются объектом фоновоего мониторинга. Результаты, полученные в Волжско-Камском и Керженском заповедниках, обнаружили значительное сходство. Близким оказались число обнаруженных видов (12 и 11 соответственно) и проективное покрытие. Видовой состав также оказался весьма сходным. Идентичным оказался и доминантный состав (*Chaenotheca ferruginea*, *Hypogymnia physodes*, *Hypocenomyce scalaris*). Обследование Якшинского участка Печоро-Илычского заповедника, проведенное в 1984 и 2001 гг., показало отсутствие достоверных изменений количественных характеристик сообщества стволовых лишайников-эпифитов.

Благодарность

Авторы благодарны Б. А. Кухте за его участие в проведении лихенологического обследования экополигона „Якша” в 2001 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бязров Л. Г. 2002. Лишайники в экологическом мониторинге. — М.: Изд-во „Научный Мир”. — 336 с.
- Инсаров Г. Э., Пчелкин А. В. 1983. Количественные характеристики состояния эпифитной лихенофлоры Саяно-Шушенского заповедника. — М. — 30 с.
- Инсаров Г. Э., Пчелкин А. В. 1980. Количественные характеристики состояния эпифитной лихенофлоры Березинского заповедника. — Обнинск: ВНИИГМИ—МЦД. — 31 с.
- Инсаров Г. Э., Пчелкин А. В. 1986. Количественные характеристики состояния эпифитной лихенофлоры Печоро-Илычского заповедника. — М. — 231 с.
- Магомедова М. А. 1996. Лишайники как компонент северных экосистем и объект мониторинга. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 16. — Л.: Гидрометеиздат, с. 105—120.
- Макрый Т. В. 1990. Лишайники Байкальского хребта. — Новосибирск: Наука. — 199 с.
- Мартин Ю. Л. Лихеноиндикация состояния окружающей среды. 1982. — В кн.: Взаимодействие лесных экосистем и атмосферных загрязнителей. — Таллин, ч. 1, с. 27—47.
- Пчелкин А. В. 1999. Фильтрующая роль лесонасаждений на примере МКАД и Национального парка „Лосиный Остров”. — В кн.: Проблемы управления качеством окружающей среды. — М., с. 225—232.

Седельникова Н. В. 1985. Лихенофлора нагорья Сангилен. — Новосибирск: Наука. — 180 с.

Семенов С. М., Захарченко Ю. В. 1996. Статистическая модель встречаемости видов и опыт оценки их разнообразия для лишайников-эпифитов. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 16. — СПб.: Гидрометеиздат, с. 247—275.

Соколов В. Е., Сыроечковский Е. Е. 1985—1990. Заповедники СССР. — М.: Мысль.

Трасс Х. Х. 1986. Криптоиндикация — быстрый и дешевый метод определения степени загрязнения атмосферного воздуха. — В кн.: Изучение загрязнения окружающей среды и его влияния на биосферу. — Л.: Гидрометеиздат, с. 107.

Трасс Х. Х. 1985. Классы полеотолерантности и экологический мониторинг. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 7. — Л.: Гидрометеиздат, с. 122—137.

Урбанавичене И. Н., Урбанавичус Г. П. 2001. Лишайники Керженского заповедника. — В кн.: Труды Государственного природного заповедника „Керженский”, т. 1, с. 149—171.

Урбанавичус Г. П., Урбанавичене И. Н. 2001. Инвентаризация лишайников. — В кн.: Летопись природы ВКГПЗ, кн. 39, с. 58—65.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В КОНЦЕ XX ВЕКА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ НА ТЕПЛООБЕСПЕЧЕННОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Е. С. Гельвер, С. М. Семенов

Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, gelver@espar.ru

Реферат. Рассматриваются три климатических показателя, характеризующих условия развития сельскохозяйственных растений — первый и второй сроки перехода среднесуточной температурой уровня 10 °С, а также сумма среднесуточных температур за этот период времени (теплообеспеченность). Построены карты-схемы изменения этих показателей в 1966—1995 гг. по сравнению с 1936—1965 гг. на основании суточных данных метеорологических наблюдений на станциях международного обмена на территории стран СНГ и Балтии.

Ключевые слова. Климатические изменения, сельскохозяйственные растения, теплообеспеченность.

THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE OVER RUSSIA'S TERRITORY AT THE END OF 20TH CENTURY ON THE AVAILABILITY OF HEAT FOR THE AGRICULTURAL PLANTS

E. S. Gelver, S. M. Semenov

Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 20B, Glebovskaya str., 107258 Moscow, Russia, gelver@espar.ru

Abstract. Three climatic indices characterizing conditions for the development of agricultural plants are considered, namely, first and second dates of crossing a level of 10 °C by daily mean temperature, and an integral of the temperature over this time spell (i.e. availability of heat). Schematic maps of changes in these indices in 1966—1995 vs. 1936—1965 are drawn on the basis of daily meteorological data from the international exchange stations located at the territory of CIS and Baltic countries.

Keywords. Climate change, agricultural plants, availability of heat.

Введение

Предотвращение изменения глобальной температуры путем сокращения эмиссии парниковых газов — дело дорогостоящее (Climate Change 2001, 2001с). Для корректной оценки целесообразности этих расходов не-

обходимо также представлять себе ущерб от изменения климата, возникающий в том случае, когда никаких действий по ограничению эмиссий не предпринимается.

По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата — МГЭИК (Intergovernmental Panel on Climate Change — IPCC), средняя глобальная температура в приповерхностном слое за последние 100—140 лет повысилась на 0,6 °C (Climate Change 2001, 2001a). Принято считать, что это антропогенное потепление, вызванное увеличением концентраций парниковых газов в атмосфере вследствие антропогенных эмиссий.

При оценке последствий изменения глобального климата чаще всего оперируют именно средним значением изменения температуры (Climate Change 2001, 2001b), а другие характеристики климата — годовой ход среднесуточной температуры, суточный ход температуры, вероятность экстремальных значений и т. д. — используются в гораздо меньшей степени. В то же время, они могут оказаться весьма существенными для оценки последствий изменения климата для систем жизнеобеспечения человека, биоразнообразия и отраслей экономики.

Следует отметить, что последствия повышения температуры могут быть как положительными, так и отрицательными, и изучать их надо в пространственном аспекте (т. е. их распределение) по отдельности для разных объектов воздействия. Если говорить о России, то нельзя полностью полагаться на то соображение, что Россия — страна с относительно холодным климатом и всякое потепление есть благо. Например, в работе (Corfee-Morlot, Höhne, 2003) приведено множество примеров негативных последствий повышения температуры на 1—4 °C.

В работе (Семенов и др., 2004) было проанализировано модельными средствами влияние изменения температуры в приповерхностном слое в 1966—1995 гг. по сравнению с 1936—1965 гг. Было показано, что, несмотря на то что среднегодовая температура практически повсеместно повысилась, фенологический срок зеленения (начало распускания листьев) у березы повисшей *Betula pendula* Roth. в некоторых частях географического пространства сдвигается в сторону более ранних дат, а в других — в сторону более поздних дат. Это следствие нелинейности зависимости этого срока от годового хода среднесуточной температуры.

В данной работе проведена аналогичная оценка климатогенных изменений трех параметров, характеризующих развитие сельскохозяйственных растений:

- первой (от начала календарного года) даты перехода среднесуточной температуры уровня 10 °C;
- второй (от начала календарного года) даты перехода среднесуточной температуры уровня 10 °C;
- показателя теплообеспеченности растения, а именно, интеграла значений температуры на отрезке времени от первой даты до второй.

Методы

Если выделен какой-либо временной отрезок $[t_1, t_2]$ длиной в $(t_2 - t_1 + 1)$ лет, то для него можно определить климатическую характеристику — годовой ход среднесуточной температуры:

$$T_j = a + b_j.$$

Здесь j — порядковый номер суток в году, a — средняя температура на рассматриваемом отрезке времени $[t_1, t_2]$, а b_j — среднее отклонение среднесуточной температуры j -х суток от a . Климатологическая традиция требует, чтобы при выполнении этой оценки длина рассматриваемого промежутка времени $(t_2 - t_1 + 1)$ была не менее 30 лет (Монин, Шишков, 1979). Процедура выделения годового хода среднесуточной температуры по рядам суточных данных с пропусками (как это часто случается) изложена в нашей работе (Семенов, Гельвер, 2002).

Последовательность $\{T_1, T_2, \dots, T_{366}\}$, получаемая в результате статистической оценки, обычно сильно “шумит”. Поэтому ее целесообразно сглаживать, например, с помощью наилучшего приближения линейными комбинациями синусоидальных функций. В последней работе использовались гармоники с периодами 1, $1/2$, $1/3$ и $1/4$ года. Обозначим такое наилучшее приближение через $\{\hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_{366}\}$.

Если принято какое-либо пороговое значение среднесуточной температуры T_{th} , то можно рассмотреть два момента времени: сутки j_b , после которых среднесуточная температура впервые переходит значение T_{th} , а также j_e , после которых среднесуточная температура окончательно переходит рубеж T_{th} . Для развития сельскохозяйственных растений значение $T_{th} = 10^\circ\text{C}$ является существенным (Шатилов, Чудновский, 1980). Также важным для развития сельскохозяйственных растений является показатель теплообеспеченности:

$$H_{10} = \sum_{j=j_b}^{j_e} T_j.$$

Для того чтобы отфильтровать статистический шум, при вычислении показателей j_b , j_e и H_{10} вместо последовательности $\{T_1, T_2, \dots, T_{366}\}$ используется последовательность $\{\hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_{366}\}$.

Результаты и обсуждение

Введенные выше показатели, характеризующие обеспеченность сельскохозяйственных растений теплом, были вычислены для географичес-

ких пунктов расположения так называемых метеорологических станций международного обмена, расположенных на территории стран СНГ и Балтии. Вычисления были проведены для двух отрезков времени: 1936—1965 гг. и 1966—1995 гг. Источником данных о среднесуточной температуре в приземном слое воздуха послужил банк суточных метеорологических данных, созданный во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ—МЦД) под руководством В. Н. Разуваева. В 2001 г. эти данные по 223 метеостанциям были размещены для свободного использования в сети ИНТЕРНЕТ (<http://www.meteo.ru/>). Они охватывают период времени, примерно соответствующий XX веку. Результаты оценок представлены на рис. 1—3.

При анализе изменений, представленных на рисунках, мы исходили из того, что в плане воздействия изменения климата наибольший интерес представляют пашни, где и произрастают основные зерновые культуры. Это территория, основная часть которой находится на Европейской части бывшего СССР. Она ограничена на севере 60-й параллелью, восточнее бассейна Волги она сужается и за Уральским хребтом распадается на отдельные ареалы, которые полностью выклиниваются в верховьях р. Оби.

Сравнивая два рассматриваемых периода времени, можно отметить, что первый срок перехода среднесуточной температурой уровня 10 °C сдвинулся в сторону более ранних дат, причем довольно значительно (см. рис. 1). Исключение составляют лишь прибалтийские районы, где наблюдаются как обратная тенденция, так и та, что выявлена на основной части территории. Однако она выражена менее ярко. Также стоит отметить уменьшение показателя при движении по данной территории на восток.

Что касается второго срока перехода среднесуточной температурой порога 10 °C (см. рис. 2), то для всей территории пашенных земельных угодий в целом характерен его сдвиг в сторону более поздних дат. Особенно заметно этот показатель изменился на территории Северного Казахстана и в бассейне р. Днестр. В Прибалтике местами наблюдаются противоположные тенденции. Отметим также, что изменение второго показателя в количественном выражении в основном меньше, чем изменение первого.

В отличие от первых двух исследуемых показателей, по третьему — теплообеспеченности растений — такой однозначной тенденции для исследуемой территории не обнаружено (см. рис. 3). Для большей части территории характерно его увеличение. Это наиболее выражено на Северном Кавказе, Южном Урале и в Северном Казахстане. В то же время на северо-западе, в основном в южной части Литвы, в Эстонии, в Молдавии, в западных районах Белоруссии и Украины наблюдается незначительное уменьшение.

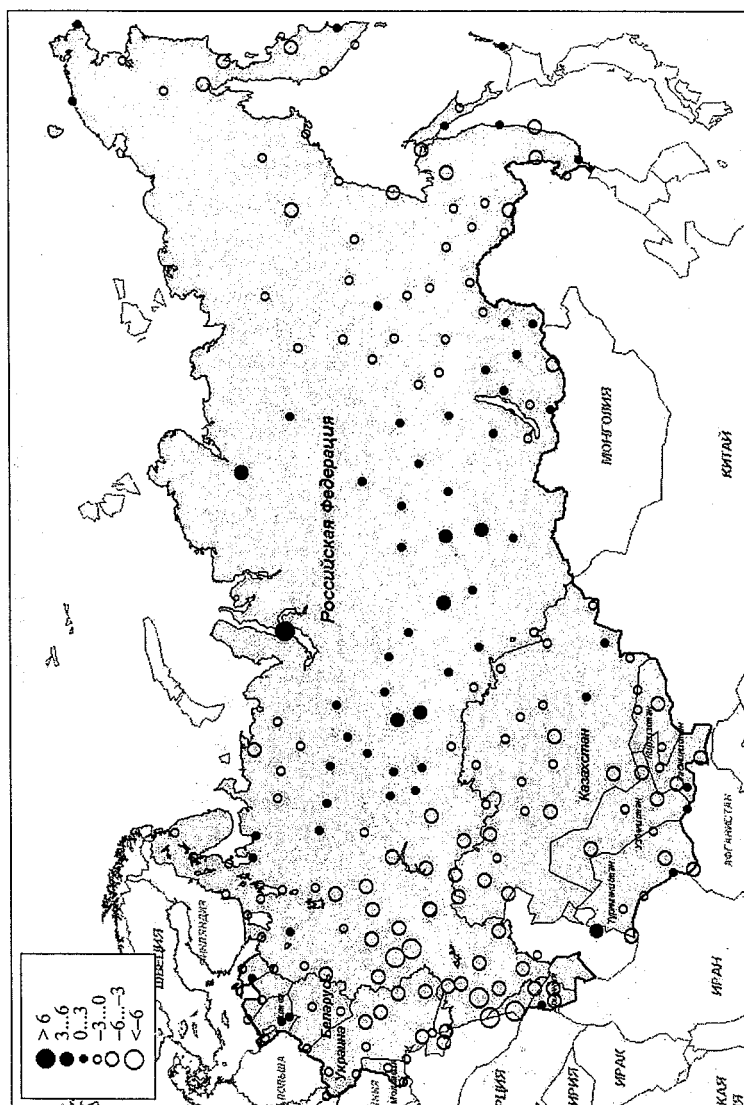


Рис. 1. Климатическое изменение в 1966—1995 гг. по сравнению с 1935—1966 гг. первого срока перехода среднесуточной температурой порога 10 °С.

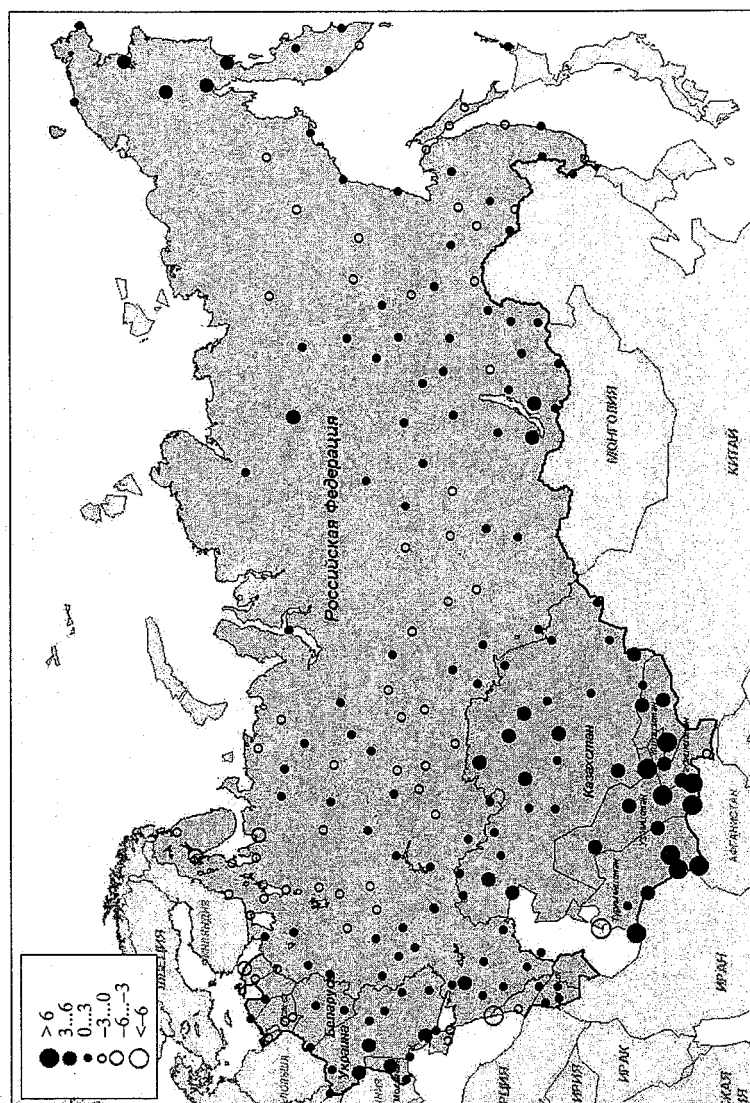


Рис. 2. Климатическое изменение в 1966—1995 гг. по сравнению с 1935—1966 гг. второго срока перехода среднесуточной температурой порога 10 °С.

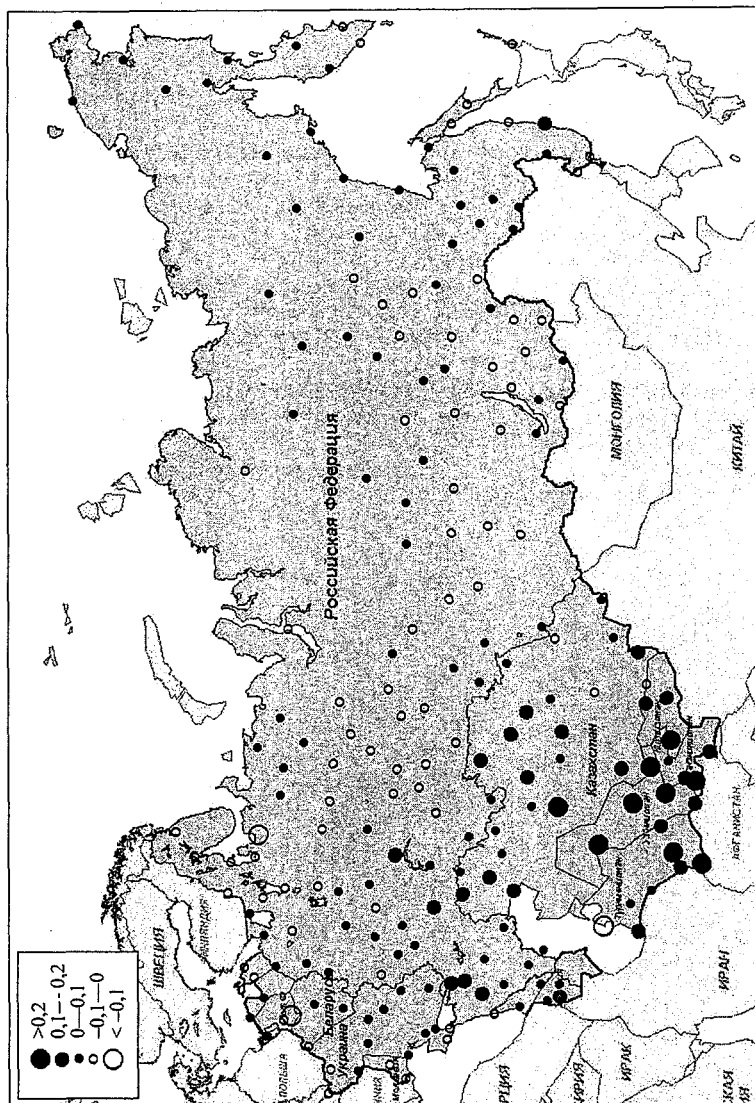


Рис. 3. Климатическое изменение в 1966—1995 гг. по сравнению с 1935—1966 гг. обеспеченности рас-
тений теплом (сумма среднесуточных температур за период от весеннего срока до осеннего срока пере-
хода среднесуточной температурой порога 10 °С, деленная на 1000).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Монин А. С., Шишков Ю. А. 1979. История климата. — Л.: Гидрометеиздат. — 407 с.

Семенов С. М., Гельвер Е. С. 2002. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. — Доклады Академии наук. Геофизика, т. 386, № 3, с. 389—394.

Семенов С. М., Кухта Б. А., Гельвер Е. С. 2004. О нелинейности климатогенных изменений сроков фенологических явлений у древесных растений. — Доклады Академии наук. Общая биология, т. 396, № 3, с. 427—429.

Шатилов И. С., Чудновский А. Ф. 1980. Агрофизические, агрометеорологические и агротехнические основы программирования урожая. — Л.: Гидрометеиздат. — 320 с.

Climate Change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J. et al., ed.). — Cambridge University Press, 2001a, 881 pp.

Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (McCarthy J. J., Canziani O. F., Leary N. A. et al., ed.). — Cambridge University Press, 2001b, 1032 pp.

Climate Change 2001. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Metz B., Davidson O., Swart R. et al., ed.). — Cambridge University Press, 2001c, 752 pp.

Corfee-Morlot J., Höhne N. 2003. Climate change: long-term targets and short-term commitments. Global Environmental Change 13, p. 277—293.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СЕЗОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОДЫ РЕКИ АМУДАРЬИ В РЕГИОНЕ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ

Ш. Хатомов, А. Жумамуратов, М. А. Жумамуратов

Институт Ядерной Физики АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан,
mirzamurat@rambler.ru

Реферат. Методом нейтронной активации исследовано содержание металлов в водах реки Амударьи, которые используются во всех отраслях сельского хозяйства и для питьевого водоснабжения жителей Южного Приаралья. Результаты анализа показали, что вода реки Амударьи загрязнена большим количеством химических элементов. В зимний сезон содержание загрязняющих веществ больше, чем в другие сезоны года, за счет сброса дренажно-коллекторных вод.

Ключевые слова. Речная вода, Амударья, микроэлементный состав, Арал.

ECOLOGICAL OBSERVATIONS OF SEASONAL CHANGES IN MICROELEMENT COMPOSITION OF THE AMHUDARYA RIVER WATER WITHIN THE SOUTH ARAL REGION

Sh. Khatomov, A. Djumamuratov, M. A. Djumamuratov

Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, Tashkent,
Republic of Uzbekistan, mirzamurat@rambler.ru

Abstract. In this paper the complexity of Amhudarya water that used at the all branches of agriculture and using by peoples of South Aral region is investigated by the method of neutron activation analyzes. By results of analyze there is shown that the waters of Amhudarya river are soiling by all chemical elements at the winter period then other periods of year at the expense of throw off from collector-drainage waters.

Keywords. River water, Amhudarya, microelement composition, Aral.

Введение

Химический состав природных вод является одним из самых информативных источников, содержащим сведения как о процессах недавнего прошлого, так и о процессах, имевших место в прошедших геологических эпохах. Изучение элементного состава природных вод всегда находится под пристальным вниманием исследователей, является актуальной зада-

чей и позволяет решать важнейшие геохимические, гидрохимические и, наконец, экологические задачи.

Усыхание Аральского моря привело к значительному гидрохимическому изменению состояния как поверхностных, так и подпочвенных вод Каракалпакии. В настоящее время исследование состояния природных вод зоны Приаралья является одной из важнейших задач современности, поскольку катастрофическая экологическая ситуация региона непосредственно связана с изменением движения, химического состава, температуры и других физико-химических и биологических свойств природных вод.

Вопросы водообеспечения отдельных регионов и качество питьевой воды в зоне Приаралья достаточно подробно изучены исследователями Каракалпакии (Абдиров и др., 1993; Атанязова и др., 1998; Реймов, 2001). В этих работах показано, что под воздействием негативных антропогенных факторов в регионе произошло снижение иммунитета у населения, в результате чего широкое распространение получили анемии, туберкулез, болезни желудочно-кишечного тракта, почек и т. д. Подчеркивается, что развитие этих заболеваний связано с употреблением питьевой воды низкого качества. Получены данные о высокой детской смертности по сравнению как со странами СНГ, так и со средними данными по Республике Узбекистан.

В связи с этим авторский коллектив поставил перед собой задачу изучения элементного состава природных вод Каракалпакии и попытался на основе этих данных проследить пути возможного рассеивания и накопления химических элементов, ухудшающих качество воды и являющихся опасными для здоровья людей. Основное внимание было уделено металлам.

Материалы и методы

Отбор проб воды был проведен из реки Амударьи и одной из центральных коллекторно-дренажных сетей региона Южного Приаралья зимой 2002 г. и весной, летом и осенью 2003 г.

Методические вопросы подготовки водных проб к активационному анализу обсуждены в работах (Хамидова, Хатамов, 1980; Корякин, Грибовская, 1988), где дается ряд рекомендаций по предотвращению потери химических элементов при длительном хранении в различных сосудах (кварц, стекло, полиэтилен и т. д.), выпариванию до состояний сухого остатка. Поэтому с учетом этих рекомендаций отбор проб воды производили только в стеклянной посуде (сорбция отдельных химических элементов не более 20 %); перед отбором дважды ополаскивали вымытые сосуды дистиллированной водой, а затем наполняли их водой, предназначенной для анализа. Выпаривание проводили на песчаной бане при температуре не выше 70—80 °С.

При определении Na, K и Ca использовали 1—5 мл воды, а содержание остальных элементов определяли из объема 250—500 мл с выпариванием до сухого остатка. Количество параллельных навесок составило 5—6 проб. Результаты усреднялись.

Содержание и распределение химических элементов в природных водах Каракалпакии было исследовано методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА). В качестве источника нейтронов использовали ядерный реактор ВВР-СМ ИЯФ АН РУз с потоком нейтронов $5 \cdot 10^{13}$ нейт./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Гамма-спектр облученных проб измеряли на установке с использованием полупроводникового Ge(Li)-детектора объемом 100 см^3 , с энергетическим разрешением 3,5 кэВ по γ -линии 1332 кэВ. Содержание элементов было определено относительным методом.

Результаты и обсуждение

Воды реки Амударьи используются для питьевого водоснабжения жителей Каракалпакии, полива сельскохозяйственных культур и других нужд региона. В результате уменьшения стока исчезли дельтовые озера, тростниковые заросли. Основные пастбища с хорошими кормовыми растениями превратились в пустыню, произошли деградация растительного покрова и формирование кочующих песков. Исчезли многие виды флоры и фауны региона, возникли серьезные социально-экологические проблемы.

Сравнительная характеристика содержания химических элементов в речных и коллекторно-дренажных водах региона приводится на рис. 1.

В формировании химического состава природных вод ведущая роль отводится их динамике. Химический состав речных вод обусловлен влиянием атмосферных осадков, взаимодействием этих вод с почвами, породами и живым веществом. Важнейшей характеристикой эрозионных, аккумулятивных и антропогенных процессов, происходящих в ландшафте, служит речной сток химических элементов.

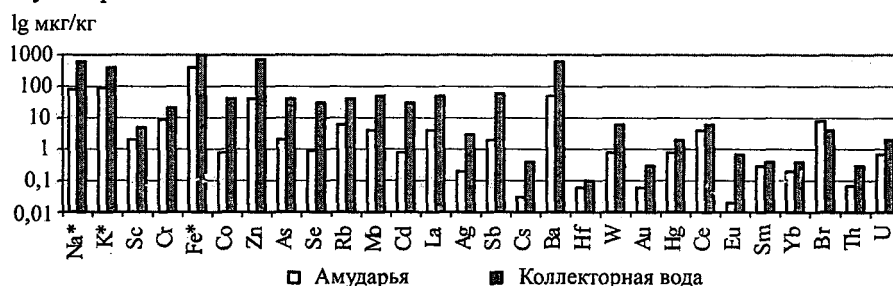


Рис. 1. Сравнительная характеристика содержания химических элементов в речных и коллекторно-дренажных водах Южного Приаралья.

Звездочка — содержание в мг/л.

Воды реки Амударьи в регионе Южного Приаралья, протекающие по сильно засоленным почвам, содержат до 1000 мг/кг растворенных примесей. Все районы региона по географическим условиям и экологической обстановке почти одинаковы.

Можно было предположить, что качественный состав воды реки Амударьи зависит от метеорологических условий и подвержен сезонным колебаниям. В весеннем сезоне традиционно начинаются земельно-мелиоративные работы. До зимнего сезона промывочные и оросительные воды сбрасываются в коллектор, а коллекторные воды — обратно в Амударью. Такие воды называются возвратными. В регионе образуется до 40—45 км³ возвратных вод, половина которых сбрасывается в реки, ухудшая качество оросительной и питьевой воды (Фройбрих и др., 2004). Коллекторные воды содержат остаточное количество агрохимикатов, минеральных солей, микроэлементов, выносимых с орошаемых территорий, в них также сбрасываются плохо очищенные коммунально-бытовые, промышленные и другие стоки.

В зимний период в результате сброса возвратных вод и питания поверхностного водотока подземными водами содержание Na, K и Ca в речной воде достигает максимума, в летнее время нормализуется, а начиная с осени опять увеличивается (рис. 2).

Как было отмечено выше, в результате сброса в реку Амударью с полей Узбекистана и Туркмении дренажно-коллекторных и технических вод резко увеличилась минерализованность воды, особенно в низовьях (до 10,0 г/л) (Атаниязова и др., 2001). В составе вод обнаружен целый

спектр хлорорганических и других пестицидов, используемых в сельском хозяйстве (Курбанов и др., 2002). Динамика роста минерализованности воды показана на рис. 3, который составлен на основе работ (Атаниязова и др., 2001;

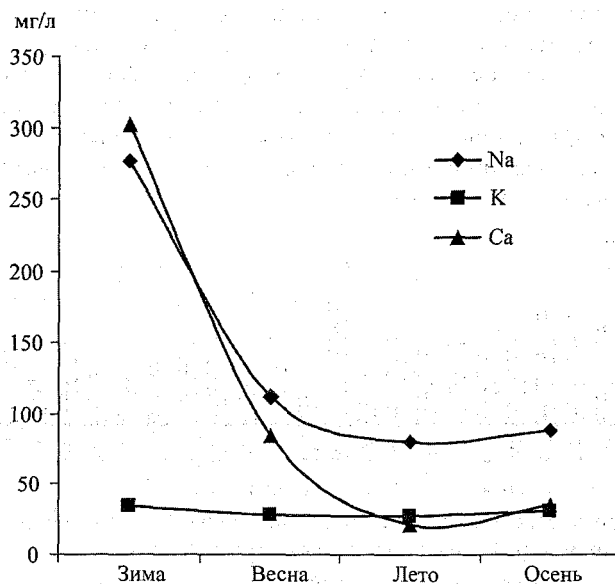


Рис. 2. Сезонные изменения содержания Na, K и Ca в воде реки Амударьи на территории Южного Приаралья.

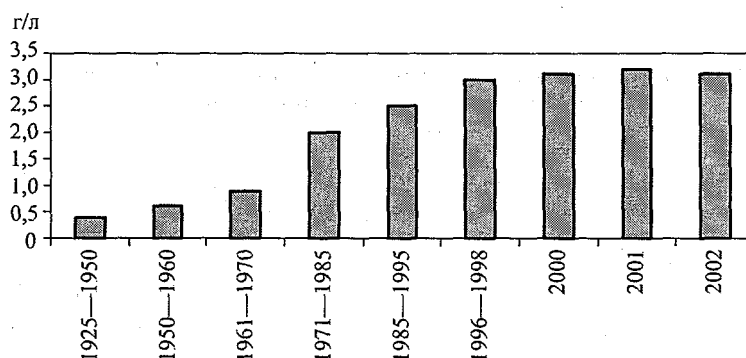


Рис. 3. Рост минерализованности воды в низовьях реки Амударьи.

Курбанов и др., 2002). Отсюда видно, что с 1960 по 2002 г. минерализованность воды увеличилась практически в 6,75 раза, поскольку монокультура хлопчатника в Каракалпакии требовала использования десятков наименований высокотоксичных средств защиты растений, в том числе некоторых биостимуляторов.

Рассмотрим сезонное изменение содержания отдельных химических элементов воды реки Амударьи (табл.1).

Натрий, калий и кальций. Натрий и калий являются доминирующими элементами в природных водах и путем выщелачивания легко выносятся из почвы. Высокие концентрации Na и K в речной воде Амударьи связаны с загрязнением вод этими элементами за счет сброса коллекторно-дренажных вод в русло реки. В зимний период содержание Na в 3,4 раза, K в 1,25 и Ca в 14,38 раза больше, чем в летний период.

Скандий и редкоземельные элементы (La, Ce, Eu, Sm, Yb и др.). Содержание всех элементов этой группы, начиная с зимы и до летнего сезона, очень высокое, что свидетельствует о том, что эти элементы легко выщелачиваются из почвы и переходят в состав речных вод региона. В зимнем сезоне речные воды значительно обогащены ими. Эти элементы входят также в состав минеральных удобрений, и в процессе их внесения почвы загрязняются не только РЗЭ, но и торием и ураном.

Железо, хром, кобальт, цинк, мышьяк, сурьма, селен, молибден, серебро, кадмий. Состав речных вод обогащен этими элементами, они хорошо выщелачиваются из почвы и тем самым обедняют состав почв, используемых в сельском хозяйстве Республики. Некоторые из этих элементов, например мышьяк и сурьма, являются постоянными компонентами всех вод, которые омывают рудные тела, особенно в зоне их окисления. Многие из них входят в состав ядохимикатов. Мышьяк и сурьма в природных условиях могут образовывать растворимые органические соединения.

Таблица 1

**Сезонные изменения содержания (мкг/л) химических элементов
в воде реки Амударья на территории Южного Приаралья**

Элемент	Река Амударья				$K_z/K_{\text{л}}$
	14.01.2002	18.03.2003	25.08.2003	17.10.2003	
Na*	277,0	112,2	80,0	88,7	3,46
K*	34,3	28,3	27,4	30,54	1,25
Ca*	302	85,1	21,0	35,6	14,38
Sc	2,0	1,45	1,37	1,89	1,45
Cr	9,0	7,4	5,18	7,24	1,73
Fe*	0,40	0,35	0,23	0,18	1,73
Co	0,8	1,32	1,5	0,57	0,53
Zn	40,0	34,3	27,2	33,42	1,47
As	2,0	3,1	2,6	2,38	0,76
Se	0,9	0,72	0,5	0,62	1,8
Rb	6,0	5,32	4,2	3,42	1,42
Mo	4,0	3,15	2,8	3,78	1,42
Cd	0,8	0,66	0,56	0,67	1,42
La	4,0	3,24	2,26	3,48	1,76
Ag	0,2	0,37	0,124	0,37	1,61
Sb	2,0	1,84	0,4	1,58	5,0
Cs	0,78	0,55	0,03	0,24	26
Ba	50,0	46,2	28,9	37,82	1,73
Hf	0,06	0,081	0,048	0,044	1,25
Au	0,06	0,051	0,024	0,0082	2,5
Hg	0,8	0,76	0,42	0,77	1,9
Ce	4,0	6,21	8,02	5,74	0,49
Eu	0,02	0,022	0,031	0,10	0,64
Sm	0,3	0,26	0,05	0,18	6,0
Yb	0,2	0,18	0,14	0,17	1,42
Th	8,0	7,21	8,31	7,2	0,96
U	1,23	1,11	0,87	1,17	1,41

Примечание. K_z — содержание химических элементов в зимнем сезоне, $K_{\text{л}}$ — содержание химических элементов в летнем сезоне; звездочка — содержание в мг/л.

В природных водах Fe и Cr могут находиться в форме взвесей самого различного состава в адсорбированном состоянии. Оба элемента по происхождению являются литогенными. Полученные для остальных элементов данные объясняются как антропогенным загрязнением, так и обогащением вод вследствие естественных процессов.

Динамика изменения содержания элементов, рассматриваемых в этой группе, в речных водах (см. табл. 1) показывает, что в условиях засоления данные элементы, по-видимому, имеются в растворимом виде и поэтому степень их выноса находится на достаточно высоком уровне. Закономерность распределения этих элементов имеет некоторую зональную направленность.

Золото, ртуть. Содержание Au и Hg в речных водах в зимний период составляет 0,006 и 0,8 мкг/л соответственно. Содержание в зимний период соответственно в $K_3/K_n = 1,24$ и $K_3/K_n = 1,9$ раза больше, чем в летний период. Уровень растворения и выноса их из почвы достаточно высок. По-видимому, их миграция связана с органоминеральными и коллоидными частицами. Содержание их в речных водах очень высоко, что, по нашему мнению, обусловлено антропогенным загрязнением и аномалиями, связанными с месторождениями либо же с их долговременным накоплением водами реки Амударьи. Конечно, такое утверждение требует уточнения, для чего необходимо привлечение геохимических методов поиска.

Рубидий, цезий, барий. Содержание Rb, Cs и Ba в зимний период составляет 6,0; 0,78 и 50,0 мкг/л соответственно и до начала летнего периода изменяется (K_3/K_n) в 1,42 (Rb), в 26 (Cs) и в 1,73 (Ba) раза. Геохимические особенности рубидия близки к калию, а цезий сходен с рубидием. Соли этих элементов хорошо растворимы в воде, хотя имеются определенные различия. Rb, Cs, Ba в природе мигрируют совместно с K и Na и быстро извлекаются из почвы вследствие хорошей растворимости.

В условиях сухого климата эти элементы менее подвижны. Практически все они участвуют в испарительной концентрации наряду с натрием, а накопление в соленых водах озер невелико, поскольку они сорбируются илами. Цезий и барий — геохимически родственные элементы, но барий относительно легко поглощается живыми организмами. Все элементы легко осаждаются на сульфатном и карбонатном барьерах.

Гафний, тантал, торий и уран. Основным источником поступления этих элементов в природные воды являются горные породы, руды, в которых эти элементы находятся в виде изоморфных примесей или в сорбированном состоянии. Содержание Hf и U (см. табл. 1) в составе речных вод имеет антропогенное происхождение, поскольку этими элементами почва загрязняется в процессе внесения минеральных удобрений, особенно фосфорных.

Заключение

Поступление и перераспределение огромной массы солей и микроэлементов с фильтрационными водами из каналов, оттоком грунтовых вод с орошаемых массивов, а также со сбросами дренажно-коллекторных вод в открытые оазисы привело к глубокой трансформации природной среды зоны Южного Приаралья, особенно в бывшей дельте Амударьи.

Результаты нейтронно-активационного анализа вод Амударьи показывают, что элементный состав вод в летнее время (июль) более или менее стабилен, а зимой, весной и в конце осени происходит загрязнение практически всеми элементами. Обнаружено повышенное содержание химических элементов в дренажно-коллекторной воде по сравнению с речной.

В зимний период содержание большинства исследованных химических элементов в речной воде больше, чем в летний период. Превышение концентраций составляет от 1,25 (K) до 26 (Cs) раз. Исключением являются Co, As, Se, Eu, Th, содержание которых зимой достигает от 0,49 до 0,96 летнего уровня. Сток солей и микроэлементов с речными водами составляет более 72 кг/га в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдиров Ч. А., Агаджанян Н. А., Северин А. Е. 1993. Экология и здоровье человека. — Нукус. — 153 с.
- Атаниязова О. А., Константинова Л. Г., Матсапаева И. В., Атаназаров К. М. 1998. Химический состав питьевых вод Республики Каракалпакии. — Вестник ККО АН РУз., Нукус, с. 4—12.
- Реймов Р. Р. 2001. Экологическая обстановка ухудшается. — Вестник ККО АН РУз., № 1, 2, с. 12—15.
- Корякин А. В., Грибовская И. Ф. 1988. Методы оптической спектроскопии и люминесценции в анализе природных и сточных вод. — М.: Наука. — 215 с.
- Хамидова Р., Хатамов Ш. 1980. Изучение потерь золота, мышьяка, сурьмы, ртути и кадмия при подготовке водных проб к анализу методом нейтронной активации. — В кн.: Радиоактивационные методы анализа объектов природного происхождения. — Ташкент: ФАН, с. 59—62.
- Фройбрих И., Разаков Р. М., Насонов В., Рахмонов Б., Рахматов Р., Алиев Р. 2004. Гидробиологическая очистка коллекторно-дренажных вод и повторное использование для орошения и рыбохозяйственных целей. — Международный семинар по теме: „Глобальные изменения, устойчивое развитие и управление окружающей средой в Средней Азии”. — Ташкент. 20—22.01.2004 г.
- Атаниязова О. А., Константинова Л. Г., Ещанов Т. Б., Курбанов А. Б. 2001. Аральский кризис и медико-социальные проблемы Каракалпакстана. — Нукус, Билим. — 116 с.
- Курбанов А. Б., Ещанов Т. Б., Ибрагимов М. А. и др. 2002. Гигиеническая оценка пестицидов, применяемых в Республике Каракалпакии. — Нукус, Билим. — 75 с.

„ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ” (ПЭММЭ)

Общие сведения об издании

Издается с 1978 г. Является продолжающимся изданием Института глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН (<http://www.igce.comcor.ru>).

В издании публикуются работы о явлениях и процессах регионального и глобального масштабов, связанных с антропогенным влиянием на климат и континентальные экосистемы, о методах его изучения с помощью мониторинга и моделирования.

Представленные в ПЭММЭ статьи рецензируются. При необходимости Редакция приглашает авторов выступить с сообщением по теме статьи на научном семинаре в ИГКЭ. Редакция просит авторов не представлять в ПЭММЭ статьи, напечатанные или же проходящие рецензирование в других изданиях. Представляемые тексты должны соответствовать тематике издания, быть написаны удовлетворительно с литературной точки зрения и оформлены в соответствии с правилами. Редакция принимает окончательное решение по поводу публикации статьи с учетом результатов рецензирования, а также учитывая качество литературной и технической подготовки текста. С правилами подготовки рукописей можно ознакомиться в ИНТЕРНЕТе на странице <http://www.igce.comcor.ru> в разделе „Объявления”. Их можно также запросить по адресу Редакции у ответственного секретаря.

ПЭММЭ включен ВАК в перечень научных изданий и журналов, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.



Уважаемые читатели!

Вы можете приобрести книги, выпускаемые
ФГУП «Гидрометеоиздат», в интернет-магазине
научно-информационного портала

GIMIZ.RU

Контактная информация:

тел/факс: (812) 352-08-15, 352-08-25

e-mail: gimiz@peterlink.ru

pr@gimiz.ru

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ**

Том XX

Редактор *О. Э. Александрова*. Художественный редактор *Л. А. Унрод*.
Технический редактор *Н. Ф. Грачев*. Корректор *Е. А. Стерлина*.
Компьютерная верстка *М. В. Дукальская*.

ЛР № 020228 от 10.11.96 г.

Подписано в печать 11.04.05. Формат 60 × 90 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 20. Уч.-изд. л. 21,78. Тираж 600 экз. Индекс 365/04.

Гидрометеоиздат. 199397. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38.

Официальный научно-информационный портал **GIMIZ.RU**

Отпечатано в типографии «САВОЖ». Заказ № 135