



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

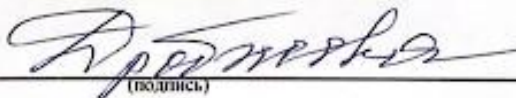
На тему: «Мезо- и микроклиматический режим агрометеорологических
характеристик»

Исполнитель Кондоба Ярослав Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Абаников Виктор Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

Доктор физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

« 16 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение	3
Глава 1. Актуальность микроклиматологии и физико-географические особенности Омской области.....	6
1.1. Влияние неоднородностей подстилающей поверхности на пространственную изменчивость метеорологических величин	6
1.2. Основные типы микроклиматов.....	9
1.3. Физико-географические особенности Омской области	16
Глава 2. Данные и методология микроклиматического анализа агрометеорологических характеристик	20
2.1. Источник данных: набор агрометеорологических показателей AgERA5	20
2.2. Обработка и подготовка данных	22
2.3. Методики расчета ключевых агрометеорологических показателей	23
Глава 3. Анализ агрометеорологических ресурсов и их пространственно-временной изменчивости в Омской области	25
3.1. Пространственный анализ ключевых агроклиматических ресурсов	25
3.2. Временная динамика и долгосрочные тренды	35
Глава 4. Влияние микроклиматической изменчивости на сельское хозяйство Омской области	38
4.1. Влияние экспозиции склона на агроклиматический потенциал фотосинтетически активной радиации (ФАР).....	38
4.1.1. Энергообеспеченность вегетационного периода	39
4.1.2. Влияние инсоляции на условия весенней вегетации	40
4.1.3. Летние условия и риски влагообеспеченности.....	40
4.2. Роль микроклимата в росте и развитии растений.....	41
4.3. Влияние микроклимата на урожайность и качество сельскохозяйственных культур ...	45
4.4. Возможные меры адаптации к микроклиматическим условиям	50
4.5. Оценка источника данных: использование реанализа ERA5 для агромикроклиматологии.....	55
Заключение	61
Список литературы.....	63

Введение

Актуальность исследования. Изучение микроклимата, то есть климатических условий на небольших участках земной поверхности, приобретает особую актуальность в контексте оптимизации сельскохозяйственного производства и адаптации к изменениям климата. Агрометеорологические характеристики, такие как температурный режим, условия увлажнения, ветровой режим и характеристики снежного покрова, определяющие рост, развитие и, в конечном счете, продуктивность агроценозов, в значительной степени формируются под влиянием локальных особенностей подстилающей поверхности. В регионах с выраженной континентальностью климата, значительными годовыми и суточными амплитудами температур и разнообразием ландшафтных условий, к которым относится Омская область, понимание микроклиматической изменчивости становится ключевым фактором для рационального использования агроклиматических ресурсов, снижения рисков неблагоприятных погодных явлений и повышения эффективности аграрного сектора. Несмотря на наличие глобальных реанализов, их пространственное разрешение не всегда позволяет полностью уловить истинные микроклиматические явления, что требует детального изучения влияния локальных физико-географических факторов на формирование агрометеорологических условий и разработки адаптивных стратегий.

Объектом исследования являются процессы формирования микроклимата и его влияние на агрометеорологические характеристики Омской области.

Предметом исследования является пространственно-временная изменчивость агрометеорологических показателей на территории Омской области, определяемая физико-географическими особенностями региона, и ее

воздействие на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Целью исследования является комплексная оценка агрометеорологических ресурсов и их микроклиматической изменчивости на территории Омской области, а также обоснование и разработка адаптивных стратегий для повышения устойчивости сельскохозяйственного производства.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Провести обзор современного состояния исследований в области изучения микроклимата и его влияния на агроэкосистемы, а также методов оценки агроклиматических ресурсов.
- Выполнить анализ физико-географических особенностей Омской области, определяющих формирование и пространственную дифференциацию микроклиматов.
- Осуществить сбор, обработку и подготовку данных глобального атмосферного реанализа ERA5 (AgERA5) для расчета ключевых агрометеорологических показателей.
- Провести пространственный анализ основных агроклиматических ресурсов Омской области (теплообеспеченность, условия увлажнения, радиационный режим), выявить закономерности их распределения и оценить степень неоднородности.
- Проанализировать временную динамику и долгосрочные тренды ключевых агрометеорологических показателей для Омской области.
- Рассмотреть роль микроклимата в росте и развитии растений, а также его влияние на урожайность и качество сельскохозяйственных культур в условиях Омской области.
- Обосновать возможные меры адаптации сельскохозяйственного производства к микроклиматическим условиям

региона.

- Провести критическую оценку используемых источников данных (реанализа ERA5) применительно к задачам агромикроклиматологии.

Методы исследования включают: системный анализ и обобщение научной литературы; методы статистической обработки и анализа метеорологических данных; методы пространственного анализа данных; сравнительный анализ и экспертная оценка. Обработка данных и построение моделей осуществлялись с использованием языка программирования Python и специализированных библиотек (xarray, pandas, numpy).

Структура работы. Дипломная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Глава 1 посвящена обоснованию актуальности микроклиматологических исследований, рассмотрению фундаментальных принципов формирования микроклимата, а также детальному анализу физико-географических особенностей Омской области, которые определяют формирование и пространственную дифференциацию микроклиматов на ее территории. Глава 2 описывает источники данных (набор агрометеорологических показателей AgERA5, основанный на реанализе ERA5), методы их обработки и методики расчета ключевых агрометеорологических показателей, используемых в данном исследовании. Глава 3 представляет результаты пространственного и временного анализа ключевых агрометеорологических показателей для территории Омской области за 44-летний период (1981-2024 гг.), выявляя основные закономерности их распределения и долгосрочные тренды. Глава 4 подробно рассматривает роль микроклимата как непосредственной среды обитания агроценозов, анализирует его влияние на формирование урожайности и качества продукции, обсуждает метеорологические основы адаптивных агротехнологий и проводит

критическую оценку используемых источников данных.

Глава 1. Актуальность микроклиматологии и физико-географические особенности Омской области

Изучение микроклимата, то есть климатических условий на небольших участках земной поверхности, приобретает особую актуальность в контексте оптимизации сельскохозяйственного производства и адаптации к изменениям климата. Агрометеорологические характеристики, такие как температурный режим, условия увлажнения, ветровой режим и характеристики снежного покрова, определяющие рост, развитие и, в конечном счете, продуктивность агроценозов, в значительной степени формируются под влиянием локальных особенностей подстилающей поверхности. В регионах с выраженной континентальностью климата, значительными годовыми и суточными амплитудами температур и разнообразием ландшафтных условий, к которым относится Омская область, понимание микроклиматической изменчивости становится ключевым фактором для рационального использования агроклиматических ресурсов, снижения рисков неблагоприятных погодных явлений и повышения эффективности аграрного сектора. Данная глава посвящена обоснованию актуальности микроклиматологических исследований, рассмотрению фундаментальных принципов формирования микроклимата, а также детальному анализу физико-географических особенностей Омской области, которые предопределяют формирование и пространственную дифференциацию микроклиматов на ее территории.

1.1. Влияние неоднородностей подстилающей поверхности на пространственную изменчивость метеорологических величин

Пространственная изменчивость метеорологических величин в приземном слое атмосферы обусловлена сложным взаимодействием солнечной радиации и воздушных масс с подстилающей поверхностью. Это взаимодействие, включая тепло- и влагообмен, является основой микроклиматологии.

Подстилающая, или деятельная, поверхность – это верхний слой земной коры (почва, вода, снег, растительность), активно участвующий в тепло- и влагообмене с атмосферой. Ее влияние на климат многогранно и осуществляется через радиационный баланс (альбедо, излучение), теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность), процессы испарения и транспирации, шероховатость (влияние на ветер) и биохимические процессы (газообмен растительности).[1]

Различия в теплофизических свойствах суши и воды приводят к тому, что прибрежные зоны обычно имеют более умеренный климат. Альбедо различных поверхностей (снег 80-90%, чернозем 10-20%) является ключевым фактором теплового баланса. Рельеф местности (горы, долины, склоны) также определяет микроклиматическую неоднородность, влияя на распределение солнечной радиации и сток холодного воздуха. Микроклиматическая изменчивость средней температуры воздуха может достигать 5–7°C, а продолжительности безморозного периода – 20-30 дней и более.[1]

На основе геотопологического анализа Е.Н. Романовой выделяются типы макрорельефа и других элементов подстилающей поверхности, формирующие мезо- и микроклиматы:

- Равнины (низменные и обычные): Характеризуются различной степенью заболоченности и относительными превышениями. Микроклиматические вариации определяются степенью заболоченности, мелиорацией, наличием небольших возвышений или пестротой почв.
- Холмистый рельеф: Отличается большим разнообразием

микроклимата из-за различий в экспозиции и крутизне склонов.

- Водные поверхности (реки, озера): Оказывают смягчающее влияние на климат прилегающих территорий (на 1-2 км от берега), увеличивая влажность и модулируя температурные колебания.[1, 2]

- Растительный покров (леса, сельхозкультуры): Формирует фитоклимат. Лес ослабляет радиацию, сглаживает суточные колебания температуры, повышает влажность и снижает скорость ветра.

- Почвенный покров: Механический состав, влажность, цвет и структура почвы влияют на ее теплофизические свойства, альбедо и термический режим.[1]

Омская область, расположенная на юге Западно-Сибирской равнины [3, 4, 5], характеризуется преимущественно равнинным рельефом (высоты 60-120 м [4]). Этот фон усложняется локальными неоднородностями:

- Озерно-западинное расчленение: На 17% территории области число западин (замкнутых понижений) составляет от 5 до 20 и более на 100 км². [6] Они создают условия для стока холодного воздуха, его застоя, что приводит к низким минимальным температурам и риску заморозков, а также влияют на увлажнение и прогрев.

- Долина реки Иртыш и ее пойма: Ширина поймы варьирует от 1-3 км до 5-10 км и более, высота над меженным уровнем – 4-10 м. Сложный рельеф поймы (прирусловые валы, старицы, острова, протоки) [2] формирует «оазисный» микроклимат с большей лесистостью, смягченным температурным режимом и повышенной влажностью.[2, 7]

- Многочисленные озера (более 16 тыс. [3]): Крупные озера (Салтаим, Тенис, Эбейты, Ульджай [3, 8, 10]) смягчают микроклимат прибрежных территорий.[1] Соленые озера могут иметь специфические микроклиматические особенности.

- Природные зоны (тайга, лесостепь, степь [3, 4]): Смена зон сопровождается сменой растительного покрова и почв, влияя на региональный и локальный климат. Лесные массивы (33.1% территории [3]) создают типичный лесной микроклимат.[1]
- Снежный покров: Мощность (25-60 см [11]) и продолжительность (150-180 дней [1]) зависят от рельефа и растительности, влияя на промерзание почвы и запасы влаги.

Ключевой особенностью формирования микроклимата Омской области является взаимодействие общего равнинного характера территории с многочисленными мелкими гидрологическими и микрорельефными неоднородностями. Это создает мозаику микроклиматов, где эффекты от замкнутых понижений и водоемов контрастируют с фоновыми условиями открытых равнин.

1.2. Основные типы микроклиматов

Микроклимат, как климат небольших участков земной поверхности (от нескольких квадратных метров до нескольких квадратных километров), обусловлен комплексом местных факторов и представляет собой детализацию общих (макро- или мезо-) климатических условий.[1] Понимание типологии микроклиматов необходимо для оценки их влияния на агрометеорологические характеристики и для разработки адаптивных стратегий в сельском хозяйстве.

Теоретическая классификация микроклиматов

Классификация микроклиматов может осуществляться по различным признакам, но чаще всего в ее основу кладут доминирующие факторы формирования. Согласно Е.Н. Романовой, агроклиматическая информация систематизируется по уровням детализации: зональный (макроклиматический),

мезоклиматический, микроклиматический и наноклиматический. Данное исследование фокусируется на микроклиматическом уровне, который характеризует территории с масштабом горизонтальных неоднородностей до 10 км и вертикальных – до 100-200 м.[1]

По доминирующим факторам формирования выделяют следующие основные типы микроклиматов:

- Орографические микроклиматы (микроклиматы рельефа):
Формируются под влиянием форм рельефа, таких как склоны различной экспозиции (южные, северные, западные, восточные) и крутизны, вершины холмов и возвышенностей, долины рек, котловины, лощины и другие понижения. Рельеф перераспределяет потоки солнечной радиации (склоны южной экспозиции получают больше тепла), влияет на условия освещенности и прогрева склонов, определяет направление и интенсивность стока холодного воздуха в ночное время (формирование радиационных заморозков в понижениях), а также модифицирует ветровой режим (усиление ветра на вершинах и перевалах, ослабление в долинах и котловинах). Например, на южных склонах приход суммарной солнечной радиации может быть на 20-30% больше, чем на северных, что ведет к их лучшему прогреву и более раннему сходу снега. В понижениях рельефа и замкнутых котловинах часто наблюдается застой холодного воздуха и, как следствие, более низкие минимальные температуры и повышенная опасность заморозков.[1]

- Фитомикроклиматы (микроклиматы растительного покрова):
Представляют собой климатические условия, складывающиеся внутри растительного покрова (фитоклимат в узком смысле) или в непосредственной близости от него. К ним относятся микроклимат леса (дендромикроклимат), сельскохозяйственных полей (агромикроклимат),

луговой растительности. Растительный покров изменяет радиационный режим (например, полог леса ослабляет солнечную радиацию, достигающую поверхности почвы, изменяет ее спектральный состав), температурный режим (сглаживает суточные амплитуды, может приводить к формированию приземных инверсий температуры внутри травостоя), влажностный режим (повышает влажность воздуха за счет транспирации и уменьшения испарения с почвы) и ветровой режим (снижает скорость ветра, создавая более спокойные условия у поверхности земли).[1]

- Гидрологически обусловленные микроклиматы: Формируются под влиянием водных объектов – побережий озер, рек, водохранилищ, а также болот.[1] Основной причиной их возникновения являются существенные различия в теплофизических свойствах воды и суши. Вода обладает значительно большей теплоемкостью и теплопроводностью по сравнению с почвой, поэтому она медленнее нагревается и медленнее остывает. Это приводит к смягчению температурного режима на прибрежных территориях: летом здесь прохладнее, а зимой теплее, суточные и годовые амплитуды температуры меньше. Испарение с водной поверхности повышает влажность воздуха, что также влияет на местный климат.

- Почвенные микроклиматы: Согласно А.М. Шульгину, это многолетний режим температуры и влажности почвы, почвенного воздуха и других элементов, зависящий от комплекса природных условий (климат, рельеф, материнские породы, растительность) и производственной деятельности человека. Климат почвы формируется под влиянием типа самой почвы (ее механического состава – песчаная, глинистая; цвета – темная, светлая; структуры; влажности), характера растительного покрова (оголенная почва, почва под травой, лесом, посевами) и мощности снежного

покрова зимой (снег является хорошим теплоизолятором).[1]

- Антропогенные микроклиматы: Возникают в результате целенаправленной или непреднамеренной хозяйственной деятельности человека. К ним относятся микроклимат городов («остров тепла»), промышленных зон, орошаемых или осушенных земель, карьеров, водохранилищ. Например, городская застройка изменяет радиационный баланс (многократное отражение между зданиями, материалы с низким альбедо), ветровой режим (эффект «улицы-каньона»), температуру воздуха (повышение на несколько градусов по сравнению с пригородами), влажность (обычно ниже) и химический состав атмосферы. Мелиоративные мероприятия, такие как осушение или орошение, существенно трансформируют водный и тепловой режим почв и приземного слоя воздуха, изменяя условия для произрастания растений.[1]

Типы микроклиматов, актуальные для Омской области

Учитывая физико-географические особенности Омской области, для ее территории актуальны следующие типы микроклиматов, часто существующие в сложных сочетаниях:

- Микроклиматы равнин (включая микроклиматы западин и грив): Являются доминирующими, так как область расположена на Западно-Сибирской равнине.[4, 10] Характеризуются относительной однородностью метеорологических условий на больших пространствах при отсутствии других влияющих факторов. Однако, как отмечалось ранее, локальные вариации возникают из-за различий в почвенном покрове (например, пятна солонцов среди черноземов) и наличия элементов микрорельефа (западин и невысоких грив-увалов).[1] В западинах формируется микроклимат понижений с застоем холодного воздуха, повышенной влажностью и риском заморозков. На гривах условия более

дренированные, ветреные и теплые.

- **Пойменные микроклиматы:** Особое значение имеет микроклимат поймы реки Иртыш и ее притоков (Омь, Тара и др.).[2, 7] Для пойменных территорий характерны повышенная влажность воздуха и почвы (за счет близости воды и богатой растительности), смягченный температурный режим с меньшими суточными и годовыми амплитудами, специфическая пойменная растительность и плодородные аллювиальные почвы. В долине Иртыша формируется так называемый «оазисный» микроклимат, благоприятный для некоторых видов хозяйственной деятельности.[7] Возможны частые туманы, особенно в переходные сезоны, и изменения в ветровом режиме под влиянием ориентации долины и прибрежных лесов.[2] Исследования, проводимые в Омском ГАУ, в частности А.Г. Болотовым, по микроклимату ландшафтов, включая пойменные, могут дать ценную информацию для данного региона.[15]

- **Лесные микроклиматы (включая микроклиматы колков):** Распространены в северной, таежной части Омской области, а также в виде березовых и осиново-березовых колков в лесостепной зоне.[3, 4] Характеризуются ослабленной солнечной радиацией под пологом деревьев, меньшими суточными колебаниями температуры воздуха (днем прохладнее, ночью теплее, чем на открытых участках), повышенной влажностью воздуха и ослабленным ветром.[1] Колки в лесостепи создают важные микроклиматические оазисы, влияя на снегораспределение, ветровой режим и влажность на прилегающих полях.

- **Степные микроклиматы:** Типичны для южных районов области.[3, 4] Отличаются высоким приходом солнечной радиации, значительными суточными и годовыми амплитудами температуры воздуха, пониженной влажностью воздуха и почвы (особенно в летний период), а

также усилением роли ветра, что может приводить к возникновению пыльных бурь и суховеев. Распашка степей изменяет их естественный микроклимат, но общие черты (теплообеспеченность, засушливость) сохраняются.

- Агромикроклиматы (микроклиматы сельскохозяйственных полей): Учитывая, что сельскохозяйственные угодья занимают почти половину территории Омской области (47.6% [3]) и являются основой ее аграрного сектора (зерновые, картофель, лен-долгунец и др. [12]), изучение этого типа микроклимата имеет первостепенное значение. Агромикроклимат зависит от вида возделываемой культуры (например, высокостебельная кукуруза создает иной микроклимат, чем низкорослая пшеница), ее фенологической фазы, высоты и густоты травостоя, а также от применяемых агротехнических приемов (например, системы обработки почвы, орошения, мульчирования, создания кулис).[1] Исследования СибНИИСХоз (ныне Омский АНЦ) по влиянию мульчирования на микроклимат посадок картофеля указывают на актуальность и практическую значимость таких работ.[13]

- Микроклиматы озерных побережий и понижений рельефа (западин): Многочисленные озера Омской области [3, 8] создают на своих побережьях локальные микроклиматы со смягченными температурными условиями (особенно это заметно для крупных озер) и повышенной влажностью воздуха. Озерно-западинный рельеф, характерный для центральных и южных районов области [6], приводит к формированию микроклиматов замкнутых понижений. В таких западинах в ясные тихие ночи происходит сток и застой холодного воздуха, что обуславливает более низкие минимальные температуры и повышенную опасность заморозков по сравнению с окружающими выровненными участками или склонами.

Неодинаковый сход снега (накопление в западинах, сдувание с возвышенностей) и оттаивание почвы на склонах различной экспозиции в условиях котловинного рельефа также вносят свой вклад в микроклиматическую неоднородность.[16]

- Почвенные микроклиматы: Значительное разнообразие почвенного покрова Омской области – от черноземов различных подтипов до подзолистых, серых лесных, болотных и засоленных почв (солонцы, солоды) [14, 17] – предопределяет существенную изменчивость их теплового и водного режимов. Разные типы почв обладают различными теплофизическими свойствами (теплоемкость, теплопроводность) и альбедо, что ведет к различиям в их температурном режиме (температура поверхности и на глубине) и, как следствие, в температуре приземного слоя воздуха.[1] Это напрямую влияет на условия произрастания сельскохозяйственных культур, скорость прорастания семян, развитие корневой системы.

Микроклимат конкретного сельскохозяйственного поля в Омской области является результатом сложного взаимодействия не одного, а нескольких из перечисленных факторов подстилающей поверхности. Например, поле озимой пшеницы, расположенное на черноземной почве в пределах поймы Иртыша, будет иметь совершенно иные микроклиматические условия по сравнению с полем ячменя на серой лесной почве в условиях озерной западины в лесостепной зоне, даже если оба поля находятся в одной и той же макроклиматической зоне. Это подчеркивает необходимость комплексного, многофакторного подхода к оценке микроклимата агроландшафтов, а не рассмотрения влияния каждого фактора в отдельности. Такой подход важен для разработки точных агрометеорологических прогнозов, дифференцированных агротехнических рекомендаций и оптимального размещения культур.

1.3. Физико-географические особенности Омской области

Физико-географические особенности региона – расположение, рельеф, климат, гидрография, почвенный покров и растительность – являются основой для формирования его климатических, в том числе мезо- и микроклиматических, условий.

Географическое положение и территория. Омская область расположена на юге Западно-Сибирской равнины, в центре Евразии, что определяет континентальность ее климата. Площадь – 141,1 тыс. км². Протяженность с севера на юг – почти 600 км, с запада на восток – более 300 км.[6, 10] Граничит с Тюменской, Томской, Новосибирской областями и Казахстаном.[4, 10] Сельскохозяйственные угодья занимают 47,6%, леса – 33,1%, водные объекты (включая болота) – 16,4%.

Рельеф и геоморфология. Рельеф преимущественно равнинный (высоты 60-120 м [4]), что обусловлено расположением на Западно-Сибирской равнине.[3, 4, 5, 10] Характерно озерно-западинное расчленение: на 17% территории число западин от 5 до 20 и более на 100 км². [6] Эти западины и гривны повышают создают волнистый микро- и мезорельеф, влияющий на сток, почвообразование и микроклимат. Долина реки Иртыш – особый геоморфологический элемент с асимметричным строением и сложной морфологией поймы (ширина 1-10 км, высота 4-10 м над меженью), создающей «оазисный» микроклимат.[2, 7]

Климатические условия. Климат континентальный, умеренно холодный.[3, 7, 19, 20] Континентальность нарастает с севера на юг.[21]

- *Температурный режим:* Средняя температура января от -19°C до -20°C, июля – от +17...+18°C (север) до +19...+20°C (юг).[11, 19, 20]

Абсолютные минимумы до -54°C (Васисс), максимумы до $+42^{\circ}\text{C}$ (степная зона).[11]

- *Осадки:* Годовое количество уменьшается с севера (400-500 мм) на юг (<300 мм).[11, 20] Большая часть (65-80%) выпадает в теплый период.
- *Ветровой режим:* Среднегодовые скорости 2.5-4.1 м/с. Зимой преобладают юго-западные и южные ветры, летом – северные и северо-западные. В степной зоне ветры вызывают пыльные бури.
- *Сезоны:* Зима продолжительная (5 месяцев), суровая, со снежным покровом (25-70 см). Лето теплое, короткое (3 месяца). Вегетационный период 150-165 дней.[11, 19] Сумма активных температур ($>+10^{\circ}\text{C}$) 1600-2150 $^{\circ}\text{C}$.
- Неблагоприятные явления: Засухи, суховеи (особенно на юге), поздневесенние и раннеосенние заморозки.[11]

Макроклиматический градиент (нарастание аридности с севера на юг) является фоном для мезо- и микроклиматических особенностей.

Гидрография. Главная река – Иртыш (длина в области >1000 км [3, 10]) с притоками Ишим, Омь, Оша, Тара и др. Всего 2929 рек.[8] Режим Иртыша зарегулирован водохранилищами.[8, 9] Пойма Иртыша – сложный комплекс с «оазисным» микроклиматом.[2, 7] Более 16 тыс. озер [3], крупнейшие – Салтаим, Тенис, Ик, Эбейты, Ульджай.[3, 8, 10] На севере озера пресные, на юге – часто соленые (Эбейты, Ульджай – лечебные грязи [3]). Болота занимают 14,8% территории (2,0 млн га [8]), преимущественно на севере.

Почвенный покров. Разнообразен из-за зональности, рельефа, пород и растительности. Преобладают черноземы (23,6%), болотные (21%), солонцы (15,6%), подзолистые (13,3%).

- *Север (тайга):* Подзолистые, глеево-подзолистые, болотные –

низкое плодородие, кислые.

- *Центр (лесостепь)*: Выщелоченные и обыкновенные черноземы, серые лесные, лугово-черноземные, часто в комплексе с солонцами и солодами.[14]
- *Юг (степь)*: Обыкновенные и южные черноземы, темно-каштановые, каштановые, широкое развитие солонцовых комплексов.
- *Поймы рек*: Аллювиальные (пойменные) почвы – высокое потенциальное плодородие.[2, 14]

Черноземы – основной пахотный фонд (3,3 млн га [14]). Солонцы и солончаки неблагоприятны для большинства культур. Разные типы почв обладают неодинаковыми теплофизическими свойствами и альбедо, что ведет к различиям в их температурном режиме и влажности, формируя различные почвенные микроклиматы.

Растительность и природные зоны. Четкая зональность: таежная зона (южная тайга), зона мелколиственных лесов, лесостепная (северная и южная) и степная зоны.[3, 4]

- *Тайга (север)*: Хвойные (ель, пихта, сосна, кедр) и лиственные (береза, осина) леса, значительная заболоченность.[3, 4]
- *Зона мелколиственных лесов*: Березовые и осиново-березовые леса.
- *Лесостепь (центр)*: Чередование лесных колков (береза, осина) с луговыми степями и пашнями.[19]
- *Степь (юг)*: Разнотравно-злаковые и типчаково-ковыльные степи, в значительной степени распаханы.[4, 10]

Общая лесистость – 33,1%.[3] Сельскохозяйственная освоенность высока в лесостепи и степи (угодья – 47,6% [3]). Основные культуры: яровая пшеница, ячмень, овес, горох, лен-долгунец, подсолнечник, картофель,

овоци.[12] Растительность поймы Иртыша разнообразна (луга, кустарники, леса).[2, 23] Естественная и культурная растительность – активный фактор формирования микроклимата (изменение радиационного баланса, температуры, влажности, ветра).

Физико-географические особенности Омской области, включая ее положение на юге Западно-Сибирской равнины, преимущественно равнинный рельеф с элементами озерно-западинного расчленения и сложной морфологией речных долин, континентальный климат с выраженным широтным градиентом тепло- и влагообеспеченности, разветвленную гидрографическую сеть во главе с рекой Иртыш, а также значительное разнообразие почвенного покрова и растительных зон, создают объективные предпосылки для формирования сложной и мозаичной структуры микроклиматических условий. Актуальность детального изучения микроклиматической изменчивости агрометеорологических характеристик в данном регионе обусловлена необходимостью научного обоснования и практического применения этих знаний для оптимизации размещения сельскохозяйственных культур, разработки адаптивных агротехнологий, снижения потерь от неблагоприятных погодных явлений и повышения общей устойчивости и эффективности сельскохозяйственного производства в условиях меняющегося климата. Понимание закономерностей формирования микроклиматов под влиянием локальных неоднородностей подстилающей поверхности является ключом к рациональному использованию агроклиматического потенциала Омской области и устойчивому развитию ее аграрного сектора.

Глава 2. Данные и методология микроклиматического анализа агрометеорологических характеристик

Для детального изучения микроклиматической изменчивости агрометеорологических характеристик Омской области был использован современный подход, основанный на данных глобального атмосферного реанализа ERA5. Этот метод позволяет преодолеть ограничения, связанные с разреженной сетью наземных метеорологических станций, и получить пространственно-непрерывную оценку климатических условий. Данная глава описывает источник данных, методы их обработки и методики расчета ключевых агрометеорологических показателей, используемых в данном исследовании.

2.1. Источник данных: набор агрометеорологических показателей AgERA5

Основным источником метеорологической информации для настоящего исследования послужил набор данных "Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis", также известный как AgERA5. Этот продукт предоставляется Службой по изменению климата Copernicus (C3S) и доступен через Климатическое хранилище данных (CDS).

Основа набора данных – реанализ ERA5. AgERA5 является производным продуктом глобального атмосферного реанализа пятого поколения ERA5,

разработанного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). ERA5 представляет собой численное описание недавней истории климата, созданное путем ассимиляции огромного количества исторических наблюдений (спутниковых и наземных) в современную модель прогнозирования погоды. Результатом является физически согласованный, полный и непрерывный во времени и пространстве набор климатических данных, который является мощным инструментом для региональных климатических исследований, особенно на территориях с редкой сетью метеостанций.

Характеристики набора данных AgERA5. Данный продукт специально адаптирован для агрометеорологических приложений. Ключевые особенности набора данных AgERA5, делающие его ценным для данного исследования, включают:

- Высокое пространственное разрешение: Данные предоставляются на регулярной сетке с разрешением $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, что позволяет проводить более детальный пространственный анализ по сравнению со стандартным разрешением ERA5 (≈ 31 км).
- Топографическая коррекция: Значения переменных скорректированы с учетом более детальной топографии, что особенно важно для правильного воспроизведения температурного режима в условиях даже слабо пересеченной местности.
- Суточная агрегация: Данные агрегированы по суточным временным шагам, что упрощает их использование для расчета большинства агроклиматических индексов.
- Широкий набор переменных: Набор данных включает в себя множество переменных, представленных в виде различных суточных статистик (среднее, минимальное, максимальное значение).

Для анализа был выбран период с 1 января 1981 года по 31 декабря 2024

года. Территория исследования охватывает Омскую область с некоторым буфером для корректного анализа граничных зон, в пределах географических координат: 53.5° – 59.0° с.ш. и 70.0° – 76.5° в.д. Были загружены следующие переменные, необходимые для расчета агроклиматических показателей:

- Температура воздуха на высоте 2 м (2m_temperature)
- Суммарные осадки (precipitation_flux)
- Приходящая коротковолновая солнечная радиация у поверхности (solar_radiation_flux)
- Общая облачность (cloud_cover)

Данные были получены в формате NetCDF, обеспечивающем удобную работу с многомерными массивами данных.

2.2. Обработка и подготовка данных

Несмотря на то, что набор данных AgERA5 является предобработанным, для корректного расчета специфических агрометеорологических показателей потребовался ряд дополнительных шагов:

- 1) Агрегация: Исходные данные с почасовым или суточным разрешением были агрегированы в соответствии с требованиями конкретных методик. Для температуры воздуха были рассчитаны среднесуточные значения. Для осадков и солнечной радиации — суточные суммы.
- 2) Конвертация единиц: Для соответствия стандартным агрометеорологическим методикам была произведена конвертация единиц: температура из Кельвинов (К) пересчитана в градусы Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), суммарные осадки из метров (м) в миллиметры (мм), а поток солнечной радиации из Джоулей на квадратный метр в день ($\text{Дж}/\text{м}^2$) в более удобные для расчетов Мегаджоули ($\text{МДж}/\text{м}^2$).

3) Пространственная выборка: Для оптимизации вычислительных процессов данные были ограничены географическими рамками Омской области.

а. В результате обработки был сформирован единый массив данных с суточным временным разрешением для каждой ячейки сетки ERA5, покрывающей исследуемую территорию, который послужил основой для всех последующих вычислений.

2.3. Методики расчета ключевых агрометеорологических показателей

Для комплексной оценки агроклиматических ресурсов и их изменчивости был рассчитан ряд стандартных для агрометеорологии показателей, широко используемых в отечественной и мировой практике (Сапожникова, 1950; Гольцберг, 1967).

1. Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК): Один из наиболее распространенных интегральных показателей влагообеспеченности территории за период активной вегетации. Он характеризует соотношение между приходом тепла и влаги и является важным критерием для оценки засушливости климата. Рассчитывался по классической формуле Г.Т. Селянинова:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum P}{0.1 \sum T_{>+10}} \quad (10)$$

где $\sum P$ — сумма осадков (мм) за период со среднесуточной температурой воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$, а $\sum T$ — сумма среднесуточных температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за тот же период.

2. Сумма активных температур (САТ): Ключевой показатель термических ресурсов вегетационного периода, определяющий возможность вызревания тех или иных сельскохозяйственных культур. Рассчитывалась как сумма среднесуточных температур воздуха за период с

устойчивой температурой выше $+10^{\circ}\text{C}$. Порог в $+10^{\circ}\text{C}$ является биологически значимым для большинства культур умеренного пояса.

3. Даты устойчивого перехода температуры через $+10^{\circ}\text{C}$: Эти даты определяют фенологические рамки периода активной вегетации. Дата весеннего перехода знаменует начало интенсивного роста растений, а дата осеннего перехода — его окончание. Даты устанавливались по стандартной методике, основанной на анализе последовательности дней с температурой выше или ниже установленного порога.

4. Продолжительность периода активной вегетации: Рассчитывалась как количество дней между датами устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $+10^{\circ}\text{C}$ весной и осенью. Этот показатель напрямую характеризует временные ресурсы для формирования урожая.

5. Фотосинтетически активная радиация (ФАР): Энергетическая основа продукционного процесса. ФАР представляет собой часть солнечной радиации (длины волн 0.38–0.71 мкм), которая непосредственно используется растениями для фотосинтеза. Оценивалась как доля от суммарной приходящей солнечной радиации (SSRD), принимаемая в расчетах равной 52%, что является общепринятым приближением для широт умеренного пояса. Суммировалась за период активной вегетации.

6. Продолжительность солнечного сияния (ПСС): Важная характеристика светового режима. Поскольку данные ERA5 не содержат прямых измерений ПСС, этот показатель оценивался косвенно через данные об общей облачности по эмпирической формуле, связывающей долю облачного покрова и астрономически возможную продолжительность солнечного сияния для данной широты и дня года.

Все расчеты выполнялись с использованием языка программирования

Python и специализированных библиотек (xarray, pandas, numpy) для обработки и анализа климатических данных.

Глава 3. Анализ агрометеорологических ресурсов и их пространственно-временной изменчивости в Омской области

На основе обработанных данных реанализа agERA5, как описано в предыдущей главе, был проведен всесторонний анализ ключевых агрометеорологических показателей для территории Омской области. Цель данной главы — представить результаты пространственного и временного анализа этих показателей за 44-летний период (1981-2024 гг.), выявить основные закономерности их распределения, оценить многолетнюю изменчивость и долгосрочные тренды.

3.1. Пространственный анализ ключевых агроклиматических ресурсов

Для оценки пространственной неоднородности агроклиматических ресурсов по территории Омской области были построены карты-схемы. Для каждого показателя были рассчитаны и визуализированы его среднее многолетнее значение, а также показатели изменчивости (стандартное отклонение и коэффициент вариации).

3.1.1. Теплообеспеченность и длительность вегетационного периода

Ключевыми показателями, характеризующими тепловые ресурсы

территории, являются сумма активных температур и продолжительность периода активной вегетации.

На Рисунке 3.1 представлена карта под названием «Среднее многолетнее "Сумма активных температур $> 5^{\circ}\text{C}$ ", $^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ », на которой показано пространственное распределение этого показателя по территории Омской области.

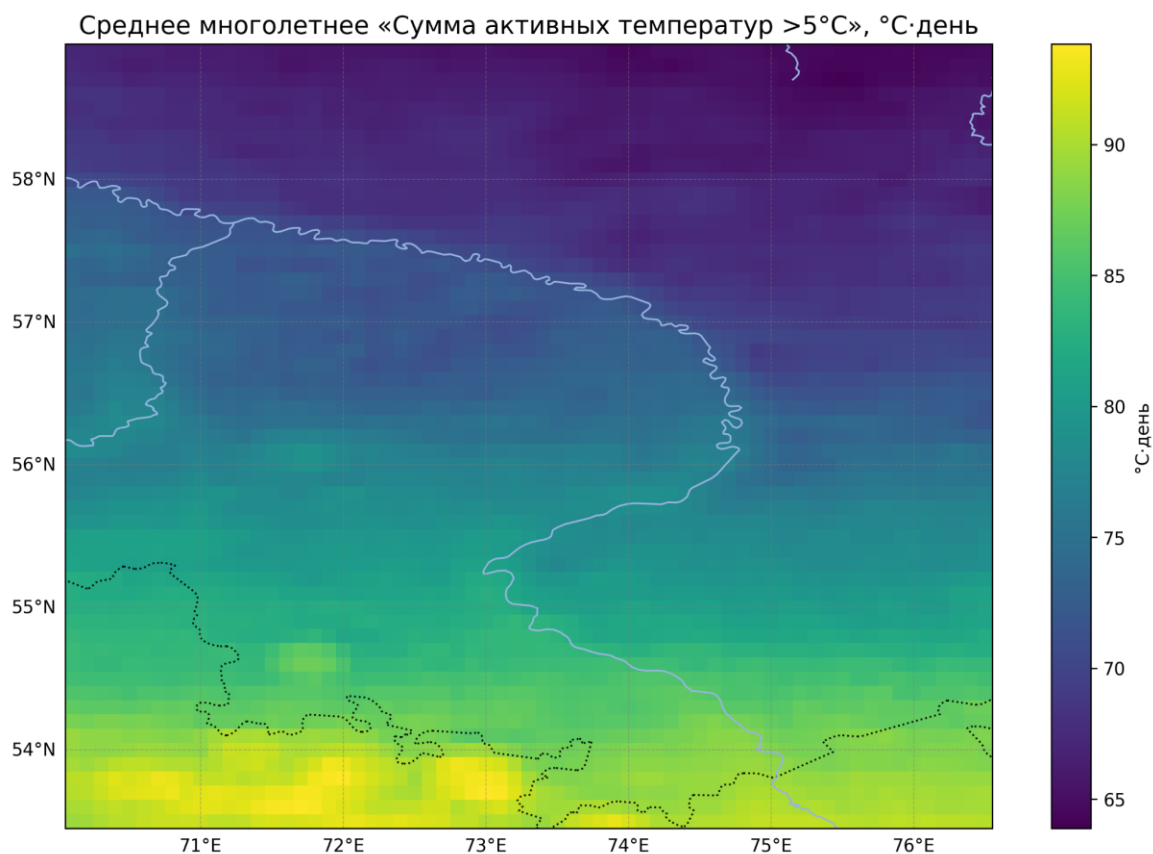


Рисунок 3.1. Карта среднего многолетнего значения САТ $> 5^{\circ}\text{C}$

Визуально на карте прослеживается чёткая и последовательная закономерность: значения показателя увеличиваются с севера на юг. Это выражено через цветовую схему, где северные районы окрашены в фиолетовые и синие тона, соответствующие более низким значениям, в то время как южные районы окрашены в зеленые и жёлтые тона, указывающие на самые высокие

значения. Согласно цветовой шкале, приведённой на графике, в северной части области (около 57° – 58° с.ш.) наблюдаются самые низкие значения, составляющие приблизительно 65 – 70 °С-дней. По мере продвижения на юг значения плавно растут, достигая в центральных районах (около 55° – 56° с.ш.) диапазона 75 – 85 °С-дней, а в самых южных районах (южнее 55° с.ш.) — максимальных значений, превышающих 90 °С-дней. Таким образом, разница между крайним севером и крайним югом области составляет около 25 °С-дней или более. Этот сильный широтный градиент в распределении тепла демонстрирует, что климатические условия, связанные с теплообеспеченностью, значительно отличаются между севером и югом региона. Южные районы получают заметно больше тепла в течение вегетационного периода, что является ключевым фактором, который влияет на природные зоны (например, тайга на севере и степь на юге) и определяет возможности для ведения сельского хозяйства. В целом, Рисунок 3.1 наглядно показывает, что распределение суммы активных температур $>5^{\circ}\text{C}$ по территории Омской области крайне неоднородно и подчиняется закону широтной зональности, что является важнейшей климатической особенностью региона, определяющей его сельскохозяйственный и природный потенциал.

На Рисунке 3.2 представлена карта, которая иллюстрирует пространственное распределение средней даты устойчивого перехода температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$ весной на территории Омской области. Этот показатель, измеряемый в днях от начала года (ДОГ), является важной характеристикой, знаменующей начало вегетационного периода для многих растений. Основная закономерность, отчетливо видимая на карте, — это широтный градиент: дата перехода наступает раньше в южных районах и позже — в северных. Это отображается цветовой шкалой, где синие и фиолетовые тона на юге соответствуют более ранним датам (меньшее значение ДОГ), а зелёные и

жёлтые тона на севере — более поздним (большее значение ДОГ).

Согласно данным графика, в южных районах области (южнее 55° с.ш.) переход через +5°C происходит в среднем на 125-130-й день года, что соответствует первой декаде мая. В центральной части области этот период смещается на 135-140-й день года (середина мая). В северных районах (севернее 57° с.ш.) весна наступает значительно позже: переход температуры происходит на 142-145-й день года, то есть в третьей декаде мая.

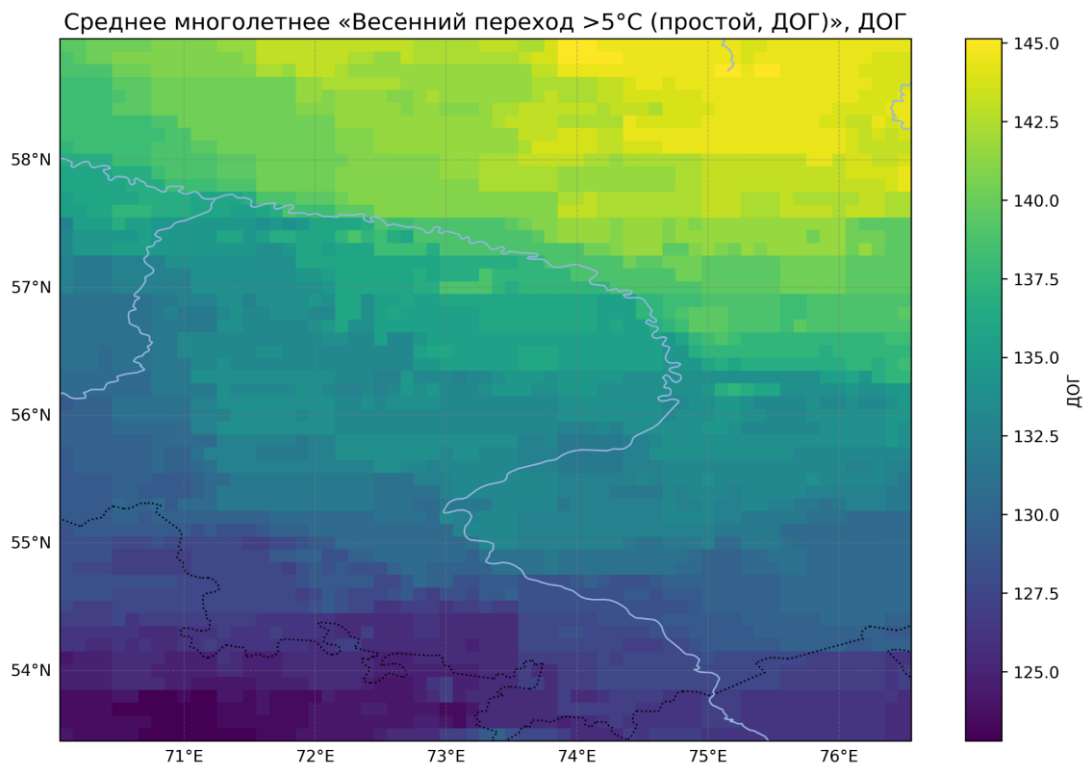


Рисунок 3.2: Карта средней даты весеннего перехода через +5°C

Таким образом, разница в сроках наступления весны между югом и севером Омской области составляет около 20 дней. Эта особенность напрямую влияет на продолжительность периода активной вегетации и является ключевым фактором, который необходимо учитывать при сельскохозяйственном планировании и определении сроков посевных работ в различных

агроклиматических зонах региона.

На Рисунке 3.3 представлена карта, иллюстрирующая среднюю дату устойчивого перехода температуры воздуха ниже $+5^{\circ}\text{C}$ осенью на территории Омской области. Этот показатель отмечает окончание вегетационного периода. На карте наблюдается обратная закономерность по сравнению с весенним переходом: осеннее похолодание наступает значительно раньше в северных районах и позже — в южных. Это выражено цветовой шкалой, где тёмные тона (фиолетовый, синий) на севере соответствуют более ранним датам (меньшее значение ДОГ), а светлые тона (зелёный, жёлтый) на юге — более поздним датам.

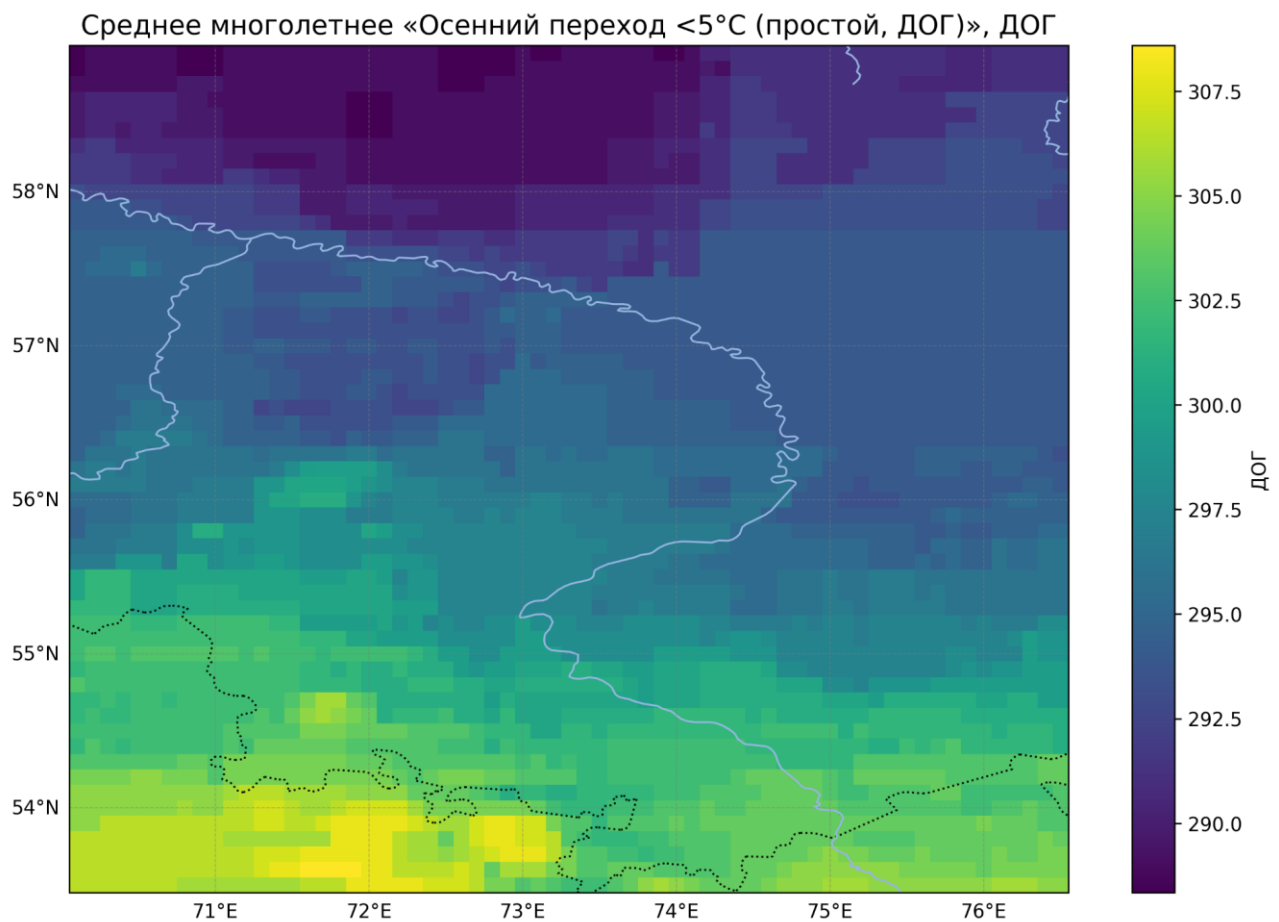


Рисунок 3.3: Карта средней даты осеннего перехода через $+5^{\circ}\text{C}$

Согласно данным графика, в северной части области (севернее 57° с.ш.) переход температуры ниже $+5^{\circ}\text{C}$ происходит в среднем на 290-295-й день года, что соответствует второй половине октября. В центральных районах этот период смещается на 295-300-й день года. На юге области (южнее 55° с.ш.) похолодание наступает заметно позже — на 305-й день года и позднее, то есть в начале ноября. Разница в сроках наступления устойчивых холодов между севером и югом составляет около 15-20 дней. В сочетании с данными о более позднем наступлении весны на севере (Рисунок 3.2), эта карта наглядно объясняет, почему продолжительность вегетационного периода в северных районах Омской области значительно короче, что является ключевым лимитирующим фактором для сельского хозяйства.

3.1.2. Условия увлажнения и риски заморозков

На Рисунке 3.4 представлена карта «Среднее многолетнее "ГТК Селянинова"», на которой показано пространственное распределение гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) по территории Омской области.

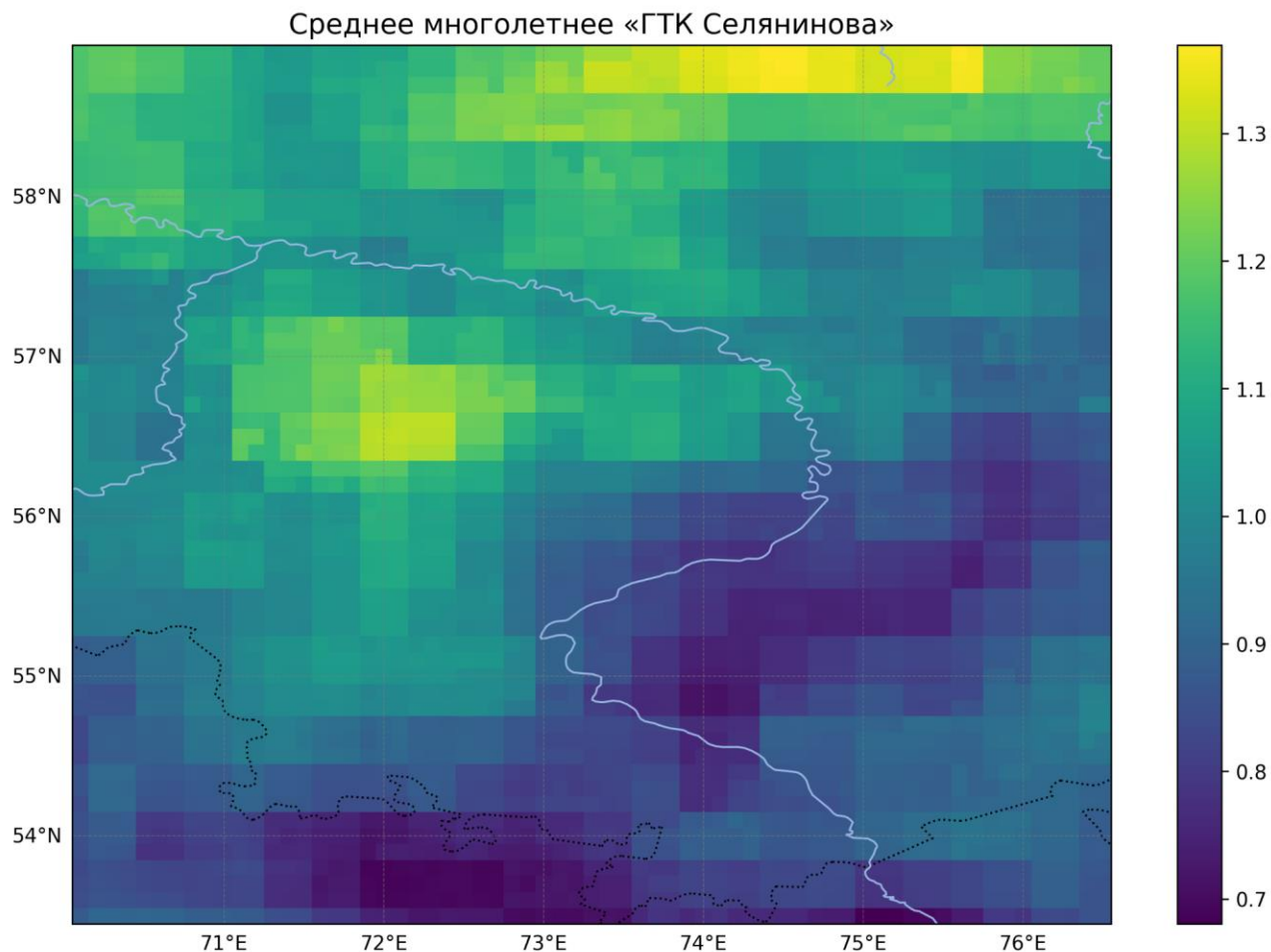


Рисунок 3.4: Карта среднего многолетнего значения ГТК

Этот интегральный показатель позволяет оценить сбалансированность тепла и влаги в период активной вегетации и является ключевым для оценки засушливости климата.

На карте виден отчётливый градиент, направленный с северо-запада на юго-восток. Северо-западные районы области, окрашенные в жёлто-зелёные тона, характеризуются самыми высокими значениями ГТК, в то время как юго-восточные районы, окрашенные в тёмно-фиолетовые тона, имеют самые низкие значения.

Согласно шкале на графике, в северо-западной части области значения ГТК достигают 1.2–1.3 и выше, что соответствует зоне достаточного или

избыточного увлажнения. По мере смещения к юго-востоку условия увлажнения ухудшаются. В центральной части ГТК находится в диапазоне 1.0–1.1. В южных и юго-восточных районах значения ГТК опускаются ниже 1.0, достигая 0.7–0.8, что характерно для засушливой зоны с недостаточным увлажнением. Эта закономерность напрямую связана с уменьшением количества осадков в том же направлении и является ключевым фактором, лимитирующим урожайность и определяющим риски засухи, особенно в южной части области. Таким образом, карта наглядно демонстрирует переход от лесной зоны с достаточным увлажнением на севере к степной засушливой зоне на юге.

На Рисунке 3.5 представлена карта, которая показывает среднее количество дней с заморозками на территории Омской области. Этот показатель является важным для оценки риска повреждения сельскохозяйственных культур низкими температурами. Карта демонстрирует общую тенденцию увеличения числа дней с заморозками с юга на север. Южные районы, окрашенные в тёмно-фиолетовые и синие тона, характеризуются наименьшим числом дней с заморозками. Северные и северо-восточные районы, окрашенные в зелёные и жёлтые тона, наоборот, имеют наибольшие значения этого показателя.

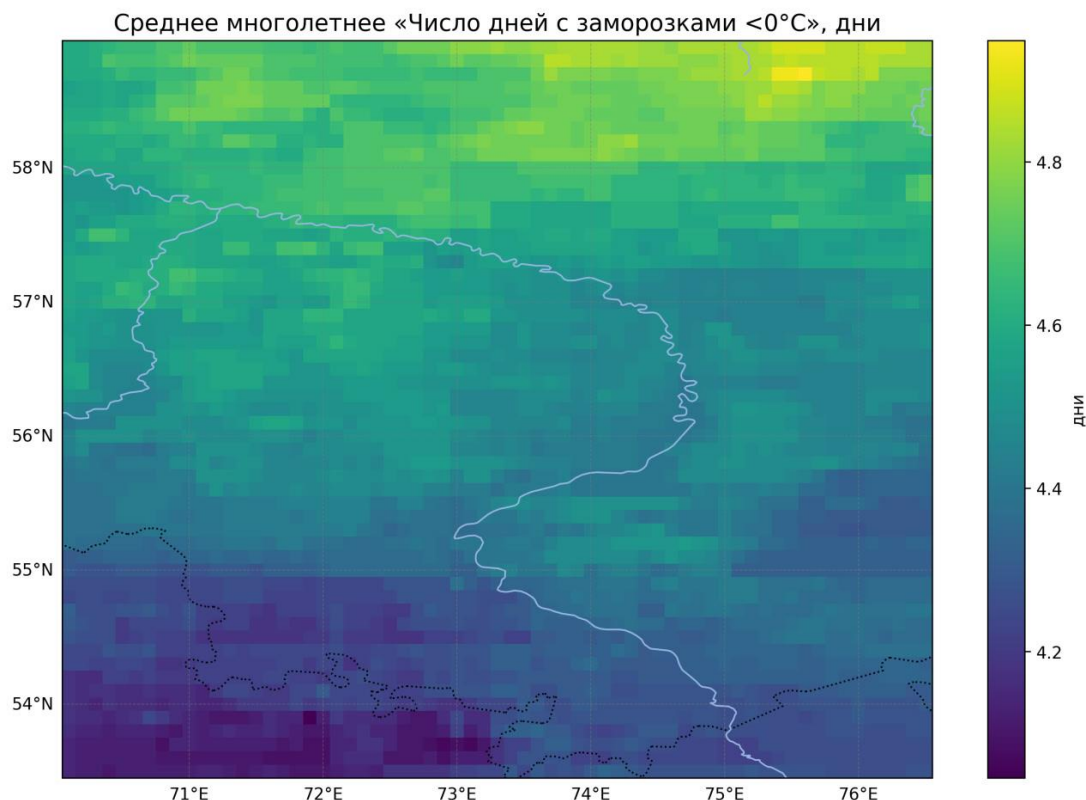


Рисунок 3.5: Карта среднегодового числа дней с заморозками

Согласно цветовой шкале, в южной части области число дней с заморозками составляет около 4.2 дня. По направлению к северу этот показатель постепенно увеличивается, достигая в центральных районах значений 4.4-4.6 дня, а в самых северных частях области превышая 4.8 дня. Таким образом, карта показывает, что агроклиматические риски, связанные с заморозками, более выражены в северных районах Омской области, что необходимо учитывать при сельскохозяйственном планировании и выборе культур для возделывания.

3.1.3. Радиационный режим

На Рисунке 3.6 представлена карта «Среднее многолетнее "Годовая сумма ФАР (МДж/м²)"», на которой показано пространственное распределение годовой

суммы фотосинтетически активной радиации (ФАР) по территории Омской области. ФАР является той частью солнечной радиации, которая напрямую используется растениями для фотосинтеза, и служит фундаментальным показателем энергетического потенциала территории для формирования урожая.

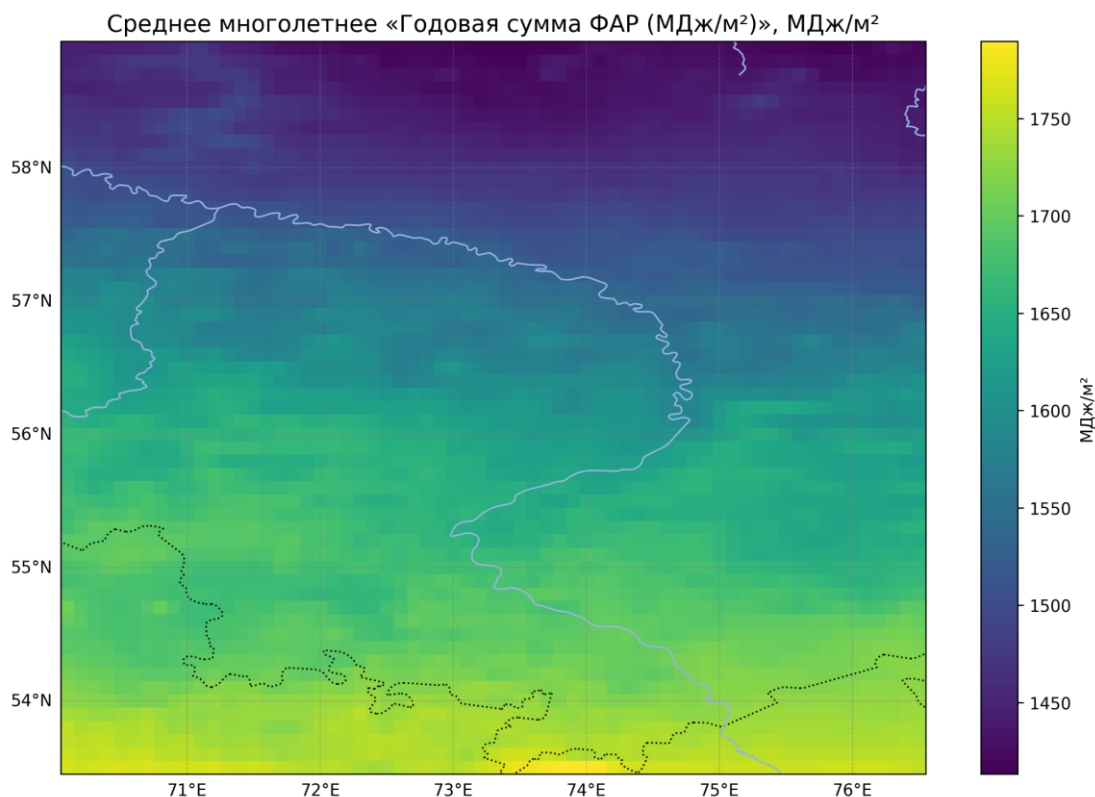


Рисунок 3.6. Среднее многолетнее Годовая сумма ФАР

На карте чётко прослеживается выраженный широтный градиент, аналогичный распределению тепла. Значения ФАР последовательно возрастают в направлении с севера на юг. Это визуально отображено через цветовую шкалу: северные районы окрашены в тёмные тона (фиолетовый, синий), соответствующие минимальным значениям, а южные — в светлые (зелёный, жёлтый), соответствующие максимальным.

Согласно шкале, в северной, таёжной зоне области (севернее 57° с.ш.)

годовая сумма ФАР составляет около 1450–1550 МДж/м². В центральных, лесостепных районах значения увеличиваются до 1600–1700 МДж/м². В южной, степной части области (южнее 55° с.ш.) приход ФАР достигает максимальных значений, превышающих 1750 МДж/м². Таким образом, разница в обеспеченности фотосинтетически активной радиацией между севером и югом региона составляет более 300 МДж/м². Этот фактор, наряду с теплообеспеченностью, является одним из ключевых лимитирующих факторов продуктивности агроэкосистем, определяя значительные различия в потенциальной урожайности сельскохозяйственных культур между природными зонами Омской области.

3.2. Временная динамика и долгосрочные тренды

Для выявления динамики климатических изменений и оценки межгодовой изменчивости были построены временные ряды для каждого показателя. Анализ включал построение линейного тренда для выявления долгосрочных тенденций.

На Рисунке 3.7 представлен временной ряд и линейный тренд для годовой суммы Фотосинтетически активной радиации (ФАР) на территории Омской области за период с 1980 по 2023 год. ФАР является ключевым источником энергии для фотосинтеза и определяет продукционный потенциал агроценозов.

График показывает значительную межгодовую изменчивость показателя: годовая сумма ФАР колеблется в широком диапазоне, от минимальных значений около 1300 МДж/м² до максимальных, достигающих почти 1800 МДж/м². Линейный тренд, показанный пунктирной линией, имеет небольшой положительный наклон (+1.916 МДж/м² в год), что визуальнo указывает на тенденцию к увеличению прихода ФАР за исследуемый период.

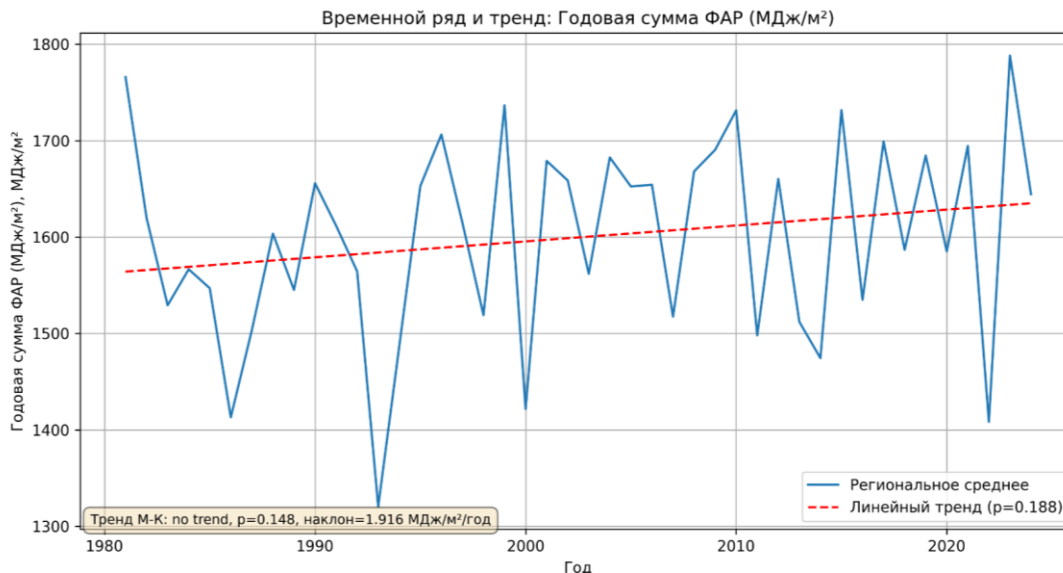


Рисунок 3.7: Карта среднегодовой суммы ФАР

Однако, как показывают результаты статистического анализа, данный тренд не является статистически значимым. Значение p -value для линейного тренда ($p=0.188$) и для непараметрического теста Манна-Кендалла ($p=0.148$) значительно превышает пороговый уровень значимости 0.05. Это говорит о том, что наблюдаемый рост показателя, скорее всего, является следствием случайных межгодовых колебаний, а не устойчивого долгосрочного изменения климата. Таким образом, можно сделать вывод, что за последние четыре десятилетия в Омской области не произошло статистически значимых изменений в ресурсах фотосинтетически активной радиации.

На Рисунке 3.8 представлен временной ряд гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), который иллюстрирует динамику условий увлажнения в Омской области за период с 1980 по 2023 год. График наглядно демонстрирует крайне неустойчивый характер увлажнения в регионе. Наблюдается значительная межгодовая изменчивость с чередованием очень влажных лет (например, пик около 2013 года, где ГТК превышает 3.0) и

экстремально засушливых периодов (например, в конце 1990-х годов, когда значения ГТК опускались ниже 0.5).

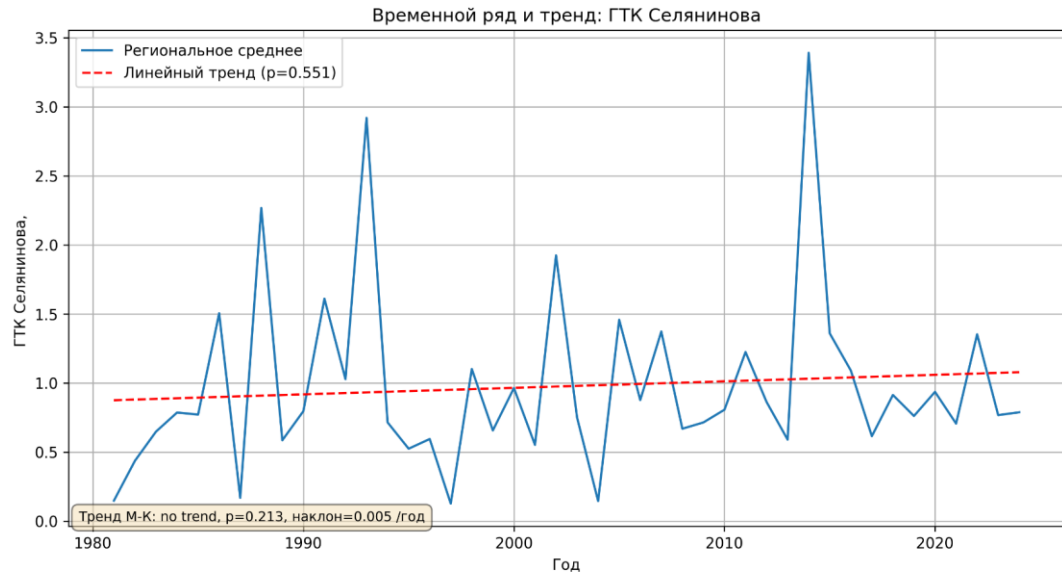


Рисунок 3.8: Временной ряд и линейный тренд ГТК

Такая высокая вариабельность подчеркивает постоянное присутствие агроклиматических рисков. Линейный тренд, показанный на графике пунктирной линией, имеет незначительный положительный наклон (+0.005 в год), что могло бы указывать на слабую тенденцию к увеличению влагообеспеченности. Однако статистический анализ показывает, что этот тренд не является значимым. Как p-value для линейного тренда ($p=0.551$), так и p-value для непараметрического теста Манна-Кендалла ($p=0.213$) значительно превышают пороговый уровень 0.05. Это свидетельствует о том, что долгосрочные, устойчивые изменения в условиях увлажнения отсутствуют, а наблюдаемые колебания носят случайный характер. Таким образом, можно заключить, что риски, связанные с засухой, остаются актуальной и постоянной проблемой для сельского хозяйства области.

Глава 4. Влияние микроклиматической изменчивости на сельское хозяйство Омской области

Результаты анализа, представленные в предыдущей главе, наглядно демонстрируют значительную пространственно-временную неоднородность агроклиматических ресурсов на территории Омской области, обусловленную как широтной зональностью (например, градиенты сумм активных температур на Рисунке 3.1 и фотосинтетически активной радиации на Рисунке 3.6), так и влиянием крупных форм рельефа и ландшафтов. Эта изменчивость, формирующаяся на мезо- и микроуровне под влиянием локальных физико-географических факторов, оказывает прямое и глубокое воздействие на все аспекты сельскохозяйственного производства. Понимание и учет этих микромасштабных вариаций климатических условий являются ключевыми для оптимизации использования агроклиматических ресурсов, снижения рисков неблагоприятных погодных явлений и повышения общей устойчивости и эффективности аграрного сектора региона. В данной главе подробно рассматривается роль микроклимата как непосредственной среды обитания агроценозов, анализируется его влияние на формирование урожайности и качества продукции, а также обсуждаются метеорологические основы адаптивных агротехнологий и проводится критическая оценка используемых источников данных.

4.1. Влияние экспозиции склона на агроклиматический потенциал фотосинтетически активной радиации (ФАР)

С целью определения влияния рельефа на условия произрастания сельскохозяйственных культур была выполнена количественная оценка

приходящих потоков фотосинтетически активной радиации (ФАР). В исследовании сопоставлялись среднемноголетние месячные суммы ФАР, рассчитанные для горизонтальной поверхности и для склонов южной и северной экспозиции с малым углом наклона (5°), характерным для агроландшафтов Омской области.

Анализ агроклиматического потенциала инсоляции

Результаты расчетов и их графическое представление приведены на Рисунке 4.1.

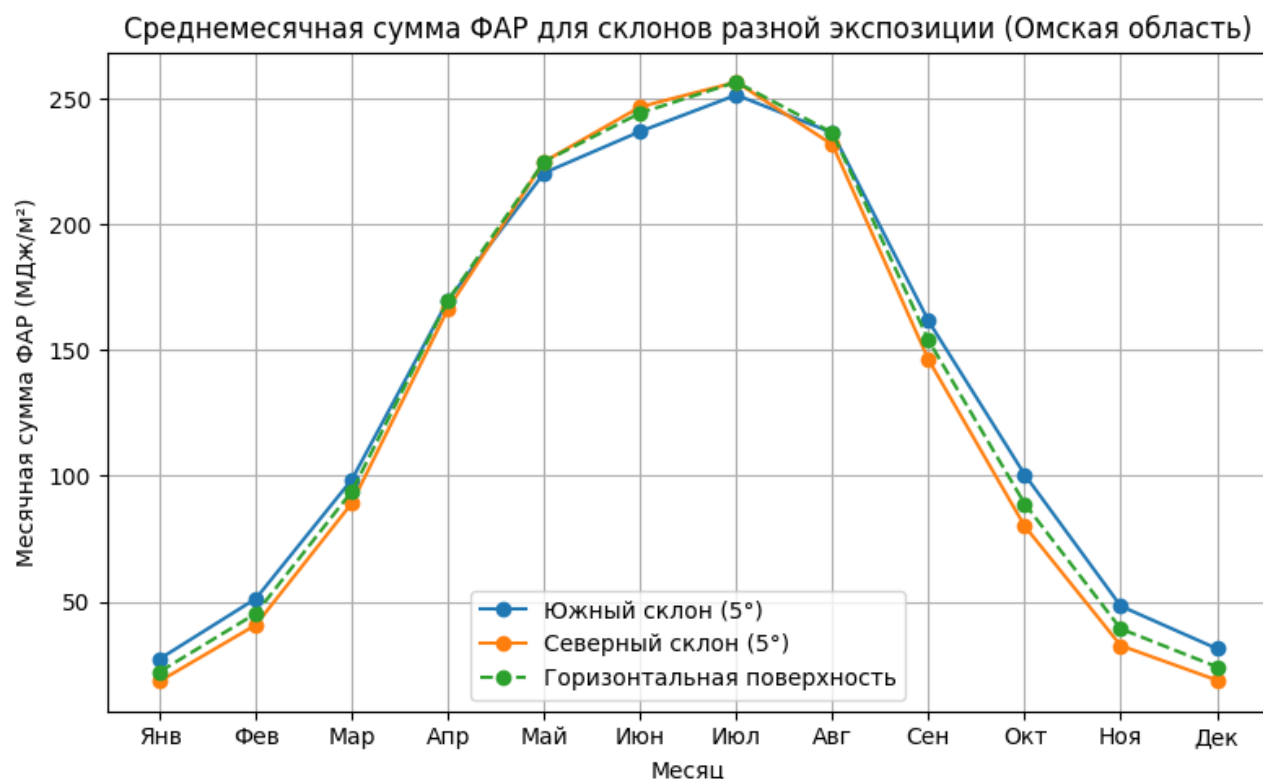


Рисунок 4.1. Среднемесячный ход ФАР для поверхностей различной ориентации в условиях Омской области.

4.1.1. Энергообеспеченность вегетационного периода

Как видно из графика, сезонный цикл притока ФАР является фундаментальным

фактором, определяющим длительность и продуктивность вегетационного периода. Годовой ход ФАР характеризуется зимним минимумом ($\sim 25\text{-}30$ МДж/м²) и летним максимумом, достигающим в июле ~ 252 МДж/м². Суммарный приток энергии в теплый период года (апрель-октябрь) формирует основной потенциал для фотосинтетической деятельности культур. Однако для аграрного производства ключевое значение имеют не только суммарные показатели, но и микроклиматические различия, возникающие на старте вегетационного периода.

4.1.2. Влияние инсоляции на условия весенней вегетации

Анализ показывает, что в весенний период южные склоны обладают значительным фенологическим преимуществом. Несмотря на небольшие абсолютные различия в месячных суммах ФАР, относительное превосходство южного склона над северным в конце зимы достигает 12%. Этот избыточный поток энергии имеет критическое значение для двух процессов:

1. Динамика снежного покрова: Повышенная инсоляция на южных склонах ускоряет созревание и таяние снега, освобождая почву для прогрева на несколько дней раньше по сравнению с ровными участками и, в особенности, северными склонами.
2. Температурный режим почвы: После схода снега дополнительная солнечная радиация обеспечивает более быстрый прогрев верхних слоев почвы до температур, необходимых для начала вегетации и проведения ранних полевых работ.

Таким образом, склоны южной экспозиции создают благоприятный микроклимат для более раннего сева и получения дружных всходов, что удлиняет фактический вегетационный период для возделываемых культур.

4.1.3. Летние условия и риски влагообеспеченности

В летний период различия в притоке ФАР между склонами сглаживаются. Однако накопленный эффект от весеннего избытка инсоляции на южных склонах может иметь и негативные последствия. Более высокие температуры поверхности и почвы в течение всего вегетационного периода приводят к усиленной эвапотранспирации (суммарному испарению), что повышает требования растений к влагообеспеченности. В засушливые годы южные склоны в большей степени подвержены риску почвенной засухи, что может привести к угнетению растений и снижению урожайности.

Результаты показывают, что даже незначительные формы рельефа создают выраженную пространственную дифференциацию агроклиматических условий. Экспозиция склона выступает как фактор, перераспределяющий приход солнечной энергии во времени, создавая "микроклиматическую мозаику":

- Склоны южной экспозиции: Характеризуются более ранним началом вегетации и большим теплообеспечением, но повышенным риском дефицита влаги.
- Склоны северной экспозиции и ровные участки: Отличаются более поздним началом вегетации, но более стабильными условиями увлажнения в течение лета.

Понимание этой дифференциации имеет высокое практическое значение для точного земледелия, позволяя адаптировать агротехнологии (сорта, сроки сева, нормы высева) к конкретным микроклиматическим условиям каждого участка поля, тем самым повышая общую продуктивность и устойчивость агроландшафта.

4.2. Роль микроклимата в росте и развитии растений

Жизнедеятельность любого растения протекает не в условиях макроклимата, описываемого данными стандартных метеорологических

станций, а в уникальной среде приземного слоя воздуха и верхнего горизонта почвы — в его собственном микроклимате, или фитоклимате (Сапожникова, 1950). Эта концепция подчеркивает, что стандартные метеорологические измерения, обычно проводимые на высоте 2 метра над стандартизированной поверхностью (например, коротко стриженный газон), могут существенно отличаться от условий непосредственно в пределах растительного покрова или у поверхности почвы на конкретном сельскохозяйственном поле. Различия в высоте культур, густоте стояния, цвете почвы и ее влажности создают уникальный энергетический баланс и, как следствие, особый фитоклимат. Локальные вариации температуры, влажности, освещенности и ветра напрямую модулируют интенсивность и направленность ключевых физиологических процессов, таких как фотосинтез, дыхание и транспирация, определяя темпы роста, прохождение фенологических фаз и общее состояние растений. Таким образом, игнорирование различий между макроклиматом и фитоклиматом может привести к неточным агротехническим решениям и неполной реализации потенциала продуктивности.

Тепловой и радиационный режим. Основой всех биологических процессов является энергия, получаемая агроценозом от Солнца. Пространственное распределение Фотосинтетически активной радиации (ФАР), оцененное для региона (Рисунок 3.6), определяет потенциал фотосинтетической продуктивности. Как показывают классические исследования (Гольцберг, 1967), на микроуровне этот режим сильно зависит от экспозиции и крутизны склонов. Южные склоны, получая больше прямой солнечной радиации, характеризуются более высоким энергетическим потенциалом, что теоретически должно ускорять фотосинтез. Однако это же приводит к сильному нагреву поверхности листьев и почвы, что может вызывать тепловой стресс и увеличивать непродуктивное испарение, особенно при недостатке влаги. Северные склоны, напротив,

находятся в условиях относительного дефицита радиации, что может ограничивать их продуктивность, особенно для теплолюбивых культур.

Температура является одним из ведущих факторов, регулирующих скорость биохимических реакций. Региональное распределение Суммы активных температур (САТ), представленное на Рисунке 3.1, напрямую коррелирует со скоростью развития культур и определяет границы их возможного возделывания. Разница в теплообеспеченности, достигающая сотен градусо-дней между севером и югом области, приводит к тому, что одни и те же культуры проходят фенологические фазы в разные сроки. Это подтверждается и картами дат перехода средней суточной температуры через $+5^{\circ}\text{C}$ весной (Рисунок 3.2) и осенью (Рисунок 3.3), которые очерчивают продолжительность вегетационного периода.

На микроуровне, особенно в условиях пересеченного рельефа Омской области с ее многочисленными западинами и ложинами, формируются так называемые "озера холода". Это явление возникает вследствие ночного радиационного выхолаживания поверхности земли в ясные, безветренные ночи. Охлажденный приземный воздух, становясь более плотным, стекает по склонам в понижения рельефа, где и застаивается. Такие локальные скопления холодного воздуха резко повышают риск заморозков, интенсивность и продолжительность которых в этих местах значительно выше, чем на окружающих возвышенных участках. Карты среднегодового числа дней с заморозками (Рисунок 3.5) показывают региональную предрасположенность к этому явлению, однако "озера холода" представляют собой микромасштабное усиление этого риска, часто не фиксируемое стандартной сетью метеостанций. Заморозки могут привести к полной гибели всходов или повреждению генеративных органов, прерывая онтогенез растений. Температура почвы, в свою очередь, определяет энергию прорастания семян и активность корневой системы. Она напрямую

зависит от теплофизических свойств грунта (теплоемкости, теплопроводности), его цвета (альбедо) и влажности, а также от характера растительного покрова и снежного покрова зимой.

Режим увлажнения. Водный баланс территории, характеризуемый на региональном уровне Гидротермическим коэффициентом Селянинова (ГТК) (Рисунок 3.4), определяет общую доступность влаги для растений. На микроуровне этот баланс существенно трансформируется. Рельеф перераспределяет атмосферные осадки и влияет на поверхностный и внутрипочвенный сток. Склоны и возвышенные участки характеризуются лучшим дренажем, но и более быстрым иссушением почвенного слоя. В понижениях рельефа, напротив, аккумулируется влага, что может быть как благоприятным фактором в засушливый период, так и неблагоприятным (вызывая переувлажнение, вымокание, развитие анаэробных процессов в почве и грибковых заболеваний) в годы с избыточным количеством осадков. Локальная влажность воздуха, повышенная вблизи водоемов и в лесных массивах (включая колки в лесостепной зоне), снижает градиент упругости водяного пара между поверхностью листа и атмосферой. Это, в свою очередь, уменьшает транспирационные потери растений и смягчает воздействие атмосферной засухи.

Ветровой режим. Ветер на микроуровне оказывает комплексное воздействие. С одной стороны, он обеспечивает приток углекислого газа к листьям, необходимого для фотосинтеза, и регулирует турбулентный обмен, предотвращая перегрев растений в жаркую погоду. С другой стороны, сильный ветер может вызывать механические повреждения растений (полегание, обрыв листьев и цветков), усиливать транспирацию, приводя к водному стрессу, особенно в условиях недостатка почвенной влаги, и способствовать ветровой эрозии почвы (дефляции), особенно на легких почвах или при отсутствии

растительного покрова. Шероховатость подстилающей поверхности, создаваемая растительностью, элементами рельефа или искусственными сооружениями (например, лесополосами), значительно изменяет структуру ветрового потока в приземном слое.

Таким образом, микроклимат создает уникальный для каждого поля или даже его части комплекс условий, который определяет траекторию роста и развития растений, их продуктивность и устойчивость к неблагоприятным факторам среды.

4.3. Влияние микроклимата на урожайность и качество сельскохозяйственных культур

Конечная продуктивность агроценоза — урожайность и качество получаемой продукции — является интегральным отражением того, насколько микроклиматические условия соответствовали биологическим требованиям возделываемой культуры на протяжении всего вегетационного периода. Нестабильность этих условий на локальном уровне, их отклонение от оптимальных значений являются одними из главных факторов, определяющих как величину, так и качественные характеристики урожая.

Влияние на урожайность. Прямые потери урожая часто являются следствием экстремальных микроклиматических явлений. Поздние весенние заморозки, интенсивность которых максимальна в замкнутых понижениях рельефа ("озерах холода"), могут полностью уничтожить урожай чувствительных культур. Например, для картофеля и овощных культур даже кратковременное понижение температуры ниже 0°C губительно для всходов и молодых растений [24]. Плодовые деревья и ягодные кустарники особенно уязвимы в период цветения, когда заморозки повреждают цветки и завязи. Для яровой пшеницы критическими являются заморозки от -1 до -2°C в период

цветения и налива зерна, которые могут привести к череззернице и снижению урожайности, хотя в фазу кущения растения выдерживают до $-8...-9^{\circ}\text{C}$ [25]. Таким образом, знание фенологии культуры и вероятности заморозков в конкретном микроклимате имеет решающее значение. Повреждение растений заморозками на разных стадиях развития имеет различные последствия: гибель молодых всходов означает полную потерю урожая с данной площади, тогда как повреждение генеративных органов на более поздних стадиях приводит к снижению количества и качества семян или плодов.

Засуха, проявление которой усиливается на южных склонах из-за высокой инсоляции и повышенных температур, или на легких песчаных и супесчаных почвах с низкой влагоемкостью, приводит к формированию щуплого, недоразвитого зерна и резкому снижению урожайности. Ранневесенние засухи, характерные для Западной Сибири, могут иссушать верхний слой почвы, что приводит к слабому развитию корневой системы яровой пшеницы и, как следствие, к резкому снижению урожайности [25]. Микроклиматические условия, такие как южная экспозиция склона, могут усугублять воздействие региональной засухи. Сочетание высокой солнечной радиации, повышенной температуры воздуха и почвы на южных склонах ведет к интенсивному испарению влаги. Если это совпадает с периодом недостаточных осадков и почвами с низкой водоудерживающей способностью (например, легкими супесями), растения испытывают острый водный дефицит, что критически сказывается на формировании урожая.

Даже при отсутствии катастрофических явлений, постоянное несоответствие микроклимата оптимальным условиям для конкретной культуры снижает ее продуктивность. Недостаток тепла на северных склонах и в северных агроклиматических зонах области, отраженный в более низких значениях САТ (Рисунок 3.1), замедляет рост и развитие растений, не позволяя им полностью

реализовать свой генетический потенциал продуктивности. Избыточное увлажнение в понижениях рельефа, особенно в годы с высоким ГТК (Рисунок 3.4), приводит к развитию корневых гнилей и других грибковых заболеваний, снижению аэрации корнеобитаемого слоя почвы и, как следствие, к существенному падению урожайности.

Влияние на качество продукции. Микроклимат оказывает значительное влияние не только на количественные, но и на качественные показатели урожая.

- Качество зерна: Условия влагообеспеченности в критические фазы развития, такие как кущение, выход в трубку, цветение и особенно налив зерна, напрямую определяют содержание белка и клейковины в зерне пшеницы. Засуха на этапе налива зерна, как правило, приводит к снижению этих показателей из-за нарушения синтеза и транспорта ассимилятов. Однако, для условий Западной Сибири отмечается интересная особенность: в умеренно сухие годы иногда собирают низкие урожаи, но с высоким содержанием клейковины, а наиболее качественное зерно часто поступает из засушливых степных районов [26]. Это может быть связано с "концентрационным эффектом", когда при недостатке влаги ограничивается накопление крахмала в большей степени, чем белка, что приводит к повышению процентного содержания последнего в общей массе зерновки. Тем не менее, сильная и продолжительная засуха негативно скажется на всех показателях. Содержание белка в зерне пшеницы может варьировать в широких пределах (11-24%) в зависимости от сорта и условий возделывания [27]. Исследования в Оренбургской области (также зона рискованного земледелия) показывают, что в засушливых условиях первой половины вегетации степень реутилизации азота из вегетативных органов в зерно может снижаться, однако определенные агротехники (например, безотвальное рыхление) и подбор сортов (степные экотипы) могут

способствовать получению зерна с высоким содержанием белка и клейковины даже при дефиците влаги [28]. Это указывает на сложную взаимосвязь между микроклиматом, генетикой растений и агротехникой.

- Содержание сахаров и крахмала: Температурный режим существенно влияет на накопление углеводов в запасающих органах растений. Для корнеплодов (например, сахарная свекла) и картофеля значительные суточные амплитуды температуры (теплые дни, способствующие активному фотосинтезу, и прохладные ночи, снижающие потери на дыхание) способствуют максимальному накоплению сахаров и крахмала. Такие условия часто складываются в центральных районах области и на склонах, не подверженных сильному ночному выхолаживанию и застойным явлениям. В условиях "островов тепла", например, на сильно прогреваемых южных склонах или в городских агломерациях, интенсивное ночное дыхание растений может приводить к повышенному расходу накопленных за день углеводов и, как следствие, к снижению их чистого накопления.

- Содержание витаминов и эфирных масел: Высокий уровень инсоляции, характерный для южных склонов, может способствовать повышению содержания некоторых витаминов (например, витамина С) и эфирных масел в лекарственных и пряно-ароматических культурах. Однако часто это сопряжено с риском теплового стресса и снижением общей биомассы растений, что требует поиска оптимального баланса.

Следовательно, эффективное управление урожайностью и качеством сельскохозяйственной продукции в условиях Омской области невозможно без детального учета мозаичности микроклиматических полей, которая определяет реальные условия произрастания культур на каждом конкретном участке.

Основные микроклиматические стрессоры и их влияние на

сельскохозяйственные культуры в Омской области:

Поздние весенние заморозки критичны для яровой пшеницы при температуре $-1...-2^{\circ}\text{C}$ в фазу цветения/налива, приводя к снижению урожайности и массы 1000 зерен [25]. Для картофеля температура воздуха $\leq 0^{\circ}\text{C}$ вызывает повреждение или гибель всходов, а также снижение урожайности клубней, с возможным повреждением самих клубней при сильных заморозках [24].

Засуха в период налива зерна (при ГТК < 0.8 условно или дефиците почвенной влаги) для яровой пшеницы приводит к формированию щуплого зерна и резкому снижению урожайности. Это может также вызвать снижение содержания белка и клейковины, хотя в степных зонах при умеренной засухе иногда наблюдается их повышение [26]. Ранневесенняя засуха, вызывая иссушение верхнего слоя почвы, приводит к слабому развитию корневой системы и резкому снижению урожайности яровой пшеницы [25].

Недостаточный суточный перепад температур (жаркие ночи) для сахарной свеклы, характерный для "островов тепла", вызывает снижение чистого накопления биомассы и сахаристости из-за повышенного ночного дыхания.

Недостаток тепла, проявляющийся на северных склонах и в северных районах области (при низких значениях САТ), замедляет рост, препятствует полной реализации генетического потенциала и снижает урожайность культур, а также задерживает созревание и может снижать накопление специфических веществ (например, сахаров).

Избыточное увлажнение в понижениях рельефа или в годы с высоким ГТК, создавая застой воды и анаэробные условия в почве, способствует развитию корневых гнилей и грибковых заболеваний, снижению аэрации корней и падению урожайности. Это также ухудшает товарный вид продукции и может способствовать развитию болезней хранения.

4.4. Возможные меры адаптации к микроклиматическим условиям

Понимание закономерностей формирования микроклимата и его влияния на агроценозы позволяет не только пассивно учитывать существующие риски, но и активно адаптировать сельскохозяйственное производство, повышая его устойчивость и эффективность. Основные направления адаптации включают агроэкологическое планирование территории и применение специальных агротехнических приемов, направленных на целенаправленное изменение или смягчение неблагоприятных микроклиматических условий.

Микроклиматическое районирование территории хозяйства. На основе детальных карт агроклиматических показателей, подобных представленным в Главе 3, и с учетом знаний о влиянии локальных факторов (рельеф, экспозиция, близость водоемов и лесных массивов), возможно проведение детального зонирования земель внутри отдельного хозяйства. Такой подход позволяет более рационально размещать сельскохозяйственные культуры в соответствии с их биологическими требованиями и спецификой микроклимата каждого участка. Например, наиболее теплые, но рискованные с точки зрения засухи южные склоны следует отводить под засухоустойчивые культуры (например, просо, некоторые сорта подсолнечника, сорго). Наиболее морозоопасные понижения рельефа, где велик риск поздневесенних и раннеосенних заморозков, целесообразно использовать под сенокосы или для возделывания поздних яровых культур, устойчивых к осенним заморозкам (например, некоторые кормовые травы). "Тепловые оазисы", такие как средние части южных склонов, защищенные от холодных ветров и не подверженные сильному застою холодного воздуха, являются оптимальными участками для размещения наиболее ценных и требовательных к теплу культур. Работы А.Г. Болотова по микроклимату ландшафтов юга Западной Сибири, включая Омскую область,

могут служить методической основой для такого внутрихозяйственного районирования.

Адаптивные агротехнологии как методы управления микроклиматом:

- Дифференцированные сроки сева: Использование карт дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через биологически значимые пороги (например, $+5^{\circ}\text{C}$ или $+10^{\circ}\text{C}$, как на Рисунке 3.2 и 3.3 из 1) позволяет оптимизировать сроки сева для каждого конкретного поля или его части. Это помогает избежать как риска повреждения всходов возвратными холодами, так и потери продуктивной весенней влаги из-за слишком позднего сева.

- Снегозадержание: В условиях континентального климата Омской области, характеризующегося холодной малоснежной или умеренно снежной зимой и риском весенне-летних засух, накопление и сохранение зимних осадков является ключевым агромелиоративным приемом. Создание кулис из высокостебельных растений (например, подсолнечника, кукурузы), оставление стерни на полях, а также правильное размещение лесозащитных лесополос изменяют аэродинамику приземного слоя воздуха. Эти меры снижают скорость ветра у поверхности почвы и способствуют отложению и удержанию снега, увеличивая мощность снежного покрова. Снег, обладая низкой теплопроводностью, защищает почву от глубокого промерзания, что благоприятно сказывается на перезимовке озимых культур и многолетних трав, а также сохраняет жизнеспособность почвенной микрофлоры. Весной талые снеговые воды создают значительный запас почвенной влаги — основу будущего урожая. Хотя количественные данные по прибавке урожая от снегозадержания для Омской области в предоставленных материалах ограничены [29], общие принципы и оценки эффективности, например, для лесополос (до 60м^3 снега на погонный метр полосы при определенных условиях

[30]), подтверждают значимость этого приема. Физические выгоды – уменьшение глубины промерзания почвы и увеличение запасов весенней влаги – неоспоримо ведут к улучшению стартовых условий для растений, что особенно важно в условиях недостаточного увлажнения южных районов Омской области.

- **Обработка почвы:** Способы и глубина обработки почвы напрямую влияют на ее водно-тепловой режим и воздушный режим. Например, гребневые посадки пропашных культур (картофель, кукуруза) увеличивают площадь поверхности почвы, изменяют угол падения солнечных лучей и способствуют более быстрому прогреву почвы весной в условиях избыточного увлажнения или на тяжелых почвах. Применение минимальных и нулевых технологий обработки почвы с сохранением пожнивных остатков (стерни) на поверхности поля создает мульчирующий слой. Этот слой снижает непродуктивное испарение влаги с поверхности почвы, защищает почву от ветровой и водной эрозии, а также способствует улучшению ее структуры и накоплению органического вещества. Исследования Омского АНЦ показывают, что при уменьшении интенсивности обработки почвы повышается эффективность использования воды растениями [29].

- **Полезащитное лесоразведение:** Создание системы лесных полос является мощным и долговременным инструментом мелиорации микроклимата и улучшения агроэкологической обстановки. Лесополосы снижают скорость ветра на прилегающих полях, что уменьшает турбулентный обмен между поверхностью поля и атмосферой. Это приводит к снижению непродуктивного испарения (эвапорации) влаги с почвы и транспирации растениями, особенно в засушливые периоды. Лесополосы способствуют более равномерному отложению и сохранению снега на полях, увеличивая запасы почвенной влаги весной. Кроме того, они повышают влажность воздуха в приземном слое на межполосных полях, создавая более благоприятные условия для роста и

развития сельскохозяйственных культур [31]. Исследования на юге Западной Сибири подтверждают значительную почвозащитную и климаторегулирующую роль лесополос, включая борьбу с эрозией и улучшение плодородия почв. Эффективность лесополосы зависит от ее конструкции (высота, продуваемость) и ориентации относительно преобладающих ветров; например, 10-метровая полоса может оказывать влияние на расстояние до 250 метров [32].

- Мульчирование: Применение мульчи (соломы, торфа, специальных пленок) на поверхности почвы также является эффективным способом регулирования ее микроклимата. Мульча подавляет рост сорняков, уменьшает испарение влаги, предотвращает образование почвенной корки, стабилизирует температуру почвы (смягчает ее суточные колебания, защищает от перегрева летом и переохлаждения весной) и улучшает ее структуру. Исследования влияния мульчирования на микроклимат и урожайность картофеля, проведенные в Омском ГАУ, подтверждают актуальность этого приема для региона.

Применение этих и других адаптивных мер в комплексе, на основе детального знания микроклиматических особенностей каждого поля и биологических требований возделываемых культур, позволяет значительно снизить зависимость сельского хозяйства от погодных аномалий и более полно реализовать агроклиматический потенциал территории Омской области. Омский Аграрный Научный Центр (Омский АНЦ) ведет активную работу по разработке и совершенствованию адаптивных агротехнологий для основных сельскохозяйственных культур региона, включая селекцию сортов, адаптированных к местным условиям, и разработку систем земледелия [33].

Эффективность адаптивных агротехнологий в модификации микроклимата и повышении сельскохозяйственной устойчивости в Омской области:

- Снегозадержание (кулисы, стерня): Увеличивает мощность

снежного покрова и снижает скорость ветра у поверхности, что приводит к уменьшению промерзания почвы, защите озимых и увеличению запасов весенней почвенной влаги, являющейся основой будущего урожая. Этот прием критически важен для всех зон, особенно для засушливых южных районов, и требует планирования структуры посевов [30].

- **Полезащитные лесополосы:** Снижают скорость ветра, уменьшают эвапорацию, способствуют равномерному снегоотложению и повышают влажность воздуха. В результате сохраняется почвенная влага, обеспечивается защита от эрозии, улучшаются условия для культур на межполосных полях и повышается урожайность. Это долгосрочные инвестиции, для которых важна правильная конструкция и размещение системы полос; высота полосы определяет зону влияния.

- **Минимальная/нулевая обработка почвы:** Сохранение стерни на поверхности (мульчирующий эффект) улучшает структуру почвы. Это приводит к снижению непродуктивного испарения, защите от эрозии, улучшению водопотребления культурами и накоплению органики. Технология требует специализированной техники и адаптации системы защиты растений, но является перспективной для всех зон [29].

- **Мульчирование:** Снижает испарение, стабилизирует температуру почвы и подавляет сорняки. В результате сохраняется влага, улучшаются условия для корневой системы и снижаются затраты на прополку. Особенно эффективно для овощных и пропашных культур; важна доступность мульчирующего материала.

- **Дифференцированные сроки сева:** Позволяет совместить сев с оптимальными температурными условиями и запасами влаги, избегая риска заморозков и потерь весенней влаги, а также обеспечивая дружные всходы. Требуется точный учет микроклимата поля и прогноза погоды, а также

использования карт перехода температур.

- Гребневые посадки: Ускоряют прогрев почвы весной и улучшают аэрацию. Это способствует более ранним всходам и снижению риска вымокания на тяжелых почвах. Актуально для пропашных культур в зонах с достаточным или избыточным увлажнением, на тяжелых почвах.

4.5. Оценка источника данных: использование реанализа ERA5 для агромикроклиматологии

Выбор данных реанализа ERA5 (и его агрометеорологического производного продукта AgERA5) в качестве основы для данного исследования не случаен и обусловлен рядом существенных преимуществ, однако также требует ясного понимания присущих этому типу данных ограничений, особенно применительно к анализу микроклиматических явлений.

Преимущества данных реанализа:

- Пространственная и временная полнота: Главное преимущество ERA5 заключается в создании непрерывного и согласованного поля метеорологических данных, покрывающего всю территорию исследования за длительный период (в данном исследовании 1981-2024 гг.). Это позволяет преодолеть основную проблему наземной сети метеорологических наблюдений — ее разреженность и наличие пропусков в данных. Для такого обширного региона, как Омская область, где метеостанции расположены на значительном расстоянии друг от друга, реанализ является практически единственным инструментом для получения детальной пространственной картины климатических условий на мезоуровне.

- Физическая согласованность: В отличие от простой интерполяции данных с редких станций, реанализ использует сложную физическую модель атмосферы, которая ассимилирует огромное количество наблюдений различного

типа. Это означает, что поля различных метеорологических величин (температуры, давления, ветра, влажности и др.) являются физически согласованными между собой, что повышает достоверность расчетов комплексных агроклиматических показателей, таких как ГТК или эвапотранспирация.

- Доступность широкого спектра переменных: ERA5 предоставляет доступ к большому количеству атмосферных и приземных переменных, многие из которых (например, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, облачность на разных ярусах, температура почвы на разных глубинах) не измеряются на стандартных агрометеорологических постах, но крайне необходимы для расчета важных агроэкологических индексов (например, ФАР, потенциальная эвапотранспирация, индексы стресса растений).

Ограничения и их значимость для агромикrokлиматического анализа:

- Разрешение сетки и масштаб микроклимата: Это ключевое ограничение при попытке использовать данные ERA5 для истинно микроклиматического анализа. Пространственное разрешение набора данных AgERA5 ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$, что соответствует примерно 10-11 км в средних широтах) представляет собой усредненное значение для ячейки сетки такого размера. Оно не способно уловить истинные микроклиматические явления, масштаб которых составляет метры, десятки или сотни метров. Например, реанализ не может воспроизвести резкие температурные контрасты между дном небольшой балки и ее бровкой, разницу в инсоляции и температуре на северном и южном склонах одного и того же холма, или специфический температурный и влажностный режим внутри густого травостоя сельскохозяйственной культуры. Следовательно, карты агроклиматических показателей, полученные в данном исследовании на основе ERA5 (представленные в Главе 3), следует интерпретировать как *мезоклиматические*, отражающие влияние крупных форм

рельефа (сотни метров и километры) и ландшафтов, но не как прямое описание микроклимата конкретного поля или его части.

- Параметризация подстилающей поверхности: Модель, лежащая в основе ERA5, использует обобщенные (усредненные для ячейки сетки) параметры для описания подстилающей поверхности, такие как тип почвы, тип растительности, альбедо, шероховатость. Эти параметры могут существенно отличаться от реальных условий конкретного сельскохозяйственного поля (например, поле под паром, поле с густой озимой пшеницей на разных стадиях развития, пастбище с различной степенью стравленности). Такие различия могут приводить к погрешностям в расчете приземных потоков тепла и влаги и, как следствие, в моделируемых значениях приземной температуры воздуха и влажности почвы.

- Воспроизведение конвективных осадков: Модели глобального масштаба, включая ERA5, могут испытывать трудности с точным воспроизведением интенсивности и пространственного распределения локальных летних ливней конвективного происхождения. Эти осадки, часто имеющие небольшой пространственный охват, но высокую интенсивность, вносят основной вклад в летние суммы осадков в регионе. Недостаточно точное моделирование таких явлений может приводить к некоторому сглаживанию и возможным смещениям в оценках сумм осадков и, соответственно, производных индексов, таких как ГТК, на локальном уровне.

- Валидация данных для региона: Хотя ERA5 проходит обширную валидацию на глобальном уровне, точность данных может варьировать регионально. Исследования по валидации ERA5 для Сибири показывают, что реанализ хорошо согласуется с данными радиозондирования для характеристик свободной атмосферы (температура, ветер на высотах). Однако для приземных переменных, особенно осадков, точность может быть ниже, и эффект

"сглаживания" из-за разрешения модели и интерполяции является известной проблемой. Ведутся работы по верификации приземной температуры и осадков ERA5-Land по стационарным данным в азиатской части России, в том числе в горных районах [34], что подчеркивает необходимость таких региональных оценок. Для равнинных территорий, подобных Омской области, точность может быть выше, чем для гор, но проблема разрешения остается. Таким образом, модель хорошо воспроизводит крупномасштабные атмосферные процессы, но ее точность снижается при переходе к локальным приземным условиям, что является общей чертой глобальных реанализов.

Несмотря на указанные ограничения, данные ERA5 являются незаменимым инструментом для региональной агроклиматической оценки. Они позволяют выявить основные пространственные закономерности распределения агроклиматических ресурсов, оценить их многолетнюю изменчивость и долгосрочные тренды, а также создать надежную основу для мезоклиматического районирования. Такое районирование, в свою очередь, служит фундаментом для планирования более детальных наземных микроклиматических исследований и разработки научно обоснованных адаптивных агротехнологий. Для преодоления масштабного разрыва между данными реанализа и потребностями локального земледелия перспективным направлением является использование методов статистического даунскейлинга (например, с применением машинного обучения [35]), которые позволяют получать оценки с более высоким пространственным разрешением, хотя и требуют тщательной калибровки и валидации на основе местных данных. Однако, наиболее надежным способом получения информации о микроклимате конкретного поля остаются прямые инструментальные измерения.

Сводка по валидации и ограничениям данных ERA5/AgERA5, релевантным для агромикроклиматологии в Сибири (включая Омскую область):

Пространственное разрешение $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ неспособно уловить явления масштабом менее 10 км (локальные контрасты температуры, инсоляции на склонах, условия в травостое). Это означает, что карты на основе ERA5 являются мезоклиматическими и не описывают микроклимат поля; требуется осторожная интерпретация для локальных решений.

Параметризация поверхности использует обобщенные параметры почвы/растительности, которые могут отличаться от реальных условий поля. Это приводит к возможным погрешностям в расчете приземных потоков тепла/влаги, температуры и влажности на конкретном поле.

Воспроизведение конвективных осадков затруднено, особенно в отношении точного воспроизведения локальных летних ливней (интенсивность, распределение). Это может привести к сглаживанию или смещению в оценках сумм осадков и гидротермического коэффициента (ГТК) на локальном уровне.

Точность профилей температуры и ветра в атмосфере показывает хорошее согласие с данными радиозондирования в Сибири, подтверждая, что ERA5 надежно воспроизводит крупномасштабные атмосферные условия, влияющие на погоду в регионе.

Точность приземной температуры и осадков требует региональной валидации; эффект "сглаживания" присутствует, и точность для осадков обычно ниже, чем для температуры. Это означает необходимость осторожного использования для точных количественных оценок на уровне поля без дополнительной валидации или даунскейлинга [34].

Общий "сглаживающий" эффект интерполяции метеополей приводит к недооценке экстремумов и сглаживанию локальных градиентов. Это несет риск недооценки локальных экстремальных явлений (например, интенсивности заморозков в "озерах холода" или пиковых значений температуры на южных склонах).

Заключение

Анализ подчеркивает глубокое и многогранное влияние микроклиматической изменчивости на все аспекты сельскохозяйственного производства в Омской области. От физиологических процессов в отдельных растениях до формирования урожайности и качества продукции в масштабах агроценоза – все эти элементы находятся под непосредственным контролем локальных вариаций температуры, влажности, освещенности и ветрового режима. Характерные для региона особенности рельефа, такие как западины и склоны различной экспозиции, в сочетании с разнообразием почвенного и растительного покрова, создают сложную мозаику микроклиматов, определяющих уникальные условия для каждого сельскохозяйственного поля.

Было показано, что экстремальные микроклиматические явления, такие как заморозки в "озерах холода" или усиление засухи на южных склонах, могут приводить к значительным потерям урожая. В то же время, хроническое несоответствие микроклиматических условий оптимальным требованиям культур снижает их продуктивность и влияет на качественные характеристики, такие как содержание белка в зерне или сахаристость корнеплодов.

Эффективное сельскохозяйственное производство в таких условиях требует перехода от усредненных региональных подходов к более дифференцированным стратегиям, основанным на детальном учете микроклиматических особенностей. Разработка и внедрение адаптивных агротехнологий, включая микроклиматическое районирование территории хозяйств, дифференцированные сроки сева, приемы снегозадержания, почвозащитные обработки и создание полезащитных лесополос, являются ключевыми направлениями для повышения устойчивости и продуктивности аграрного сектора.

Использование современных источников данных, таких как реанализ ERA5, предоставляет ценную информацию для оценки мезоклиматических ресурсов и их изменчивости на региональном уровне. Однако для задач агромикроклиматологии необходимо четко осознавать ограничения, связанные с пространственным разрешением таких данных, и дополнять их результатами наземных наблюдений и более детального моделирования.

В конечном счете, успешная адаптация сельского хозяйства Омской области к существующей микроклиматической неоднородности и потенциальным будущим изменениям климата зависит от комплексного подхода, сочетающего глубокое научное понимание локальных агроклиматических условий с разработкой и внедрением инновационных и ресурсосберегающих агротехнологий.

Список литературы

1. Романова, Е. Н. Методы мезо- и микроклиматического районирования для целей оптимизации размещения сельскохозяйственных культур с применением технологии автоматизированного расчета / Е. Н. Романова, Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2003. – 103 с.
2. Байкалова, Т. В. Растительный покров поймы Иртыша (в пределах Павлодарской области) / Т. В. Байкалова. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1981. – 232 с. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/287487490.pdf> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.
3. Омская область // Большая Российская Энциклопедия : [сайт]. – URL: <https://bigenc.ru/c/omskaia-oblast-f7804c> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.
4. Физико-географическая характеристика. Омская область // Инвестиционный портал Омской области : [сайт]. – URL: <https://investomsk.ru/ru/article/general-information> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.
5. География Омской области : учебное пособие / ОмГТУ. – Омск, 2010. – URL: https://omgtu.ru/general_information/institutes/institute-of-design-and-technology/faculty-of-economics-and-service-technologies/the-department-of-tourism-hotel-and-restaurant-business/Учебное%20пособие.%20География%20Омской%20области.pdf (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.
6. Атлас Омской области. – Омск : Омская картографическая фабрика Роскартографии, 1996. – 48 с.
7. Климат Омской области // Википедия — свободная

энциклопедия : [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Климат_Омской_области (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

8. Водные ресурсы Омской области // Федеральное агентство водных ресурсов : [сайт]. – URL: <https://voda.gov.ru/maps/omskaya-oblast/> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

9. Гидрологический режим реки Иртыш и его влияние на экосистемы поймы в условиях зарегулированного стока / под ред. А. В. Иванова. – Новосибирск : Наука, 2010. – 250 с.

10. Омская область // Википедия — свободная энциклопедия : [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Омская_область (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

11. Агроклиматические ресурсы Омской области : Справочник / под ред. А. Н. Смирнова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. – 120 с.

12. Сельское хозяйство Омской области: Статистический сборник / Омкстат. – Омск, 2023.

13. Кумпан, А. В. Влияние мульчирования на микроклимат и урожайность картофеля в условиях южной лесостепи Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / А. В. Кумпан ; Омский государственный аграрный университет. – Омск, 2007. – 22 с.

14. Почвы Омской области // Агроэкологический атлас России и сопредельных стран : [сайт]. – URL: http://www.agroatlas.ru/ru/content/omskaya_oblast/ (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

15. Болотов, А. Г. Микроклимат ландшафтов юга Западной Сибири / А. Г. Болотов. – Омск : Изд-во ОмГАУ, 2004. – 186 с.

16. Гольцберг, И. А. Микроклимат и его значение в сельском

хозяйстве / И. А. Гольцберг. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1957. – 320 с.

17. Почвенная карта Омской области. Масштаб 1:1 000 000 / ГУГК. – Москва, 1988.

18. Западно-Сибирская равнина // Большая Российская Энциклопедия : [сайт]. – URL: <https://bigenc.ru/c/zapadno-sibirskaja-ravnina-c8921a> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

19. География Омской области : Учебное пособие / под ред. Ю. М. Слободкина. – Омск : Изд-во ОмГПУ, 2003. – 215 с.

20. Климат Омска // Википедия — свободная энциклопедия : [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Климат_Омска (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

21. Агроклиматическое районирование Омской области / отв. ред. С. П. Виноградов. – Новосибирск : ЗапСибНИГМИ, 1985. – 150 с.

22. Правила землепользования и застройки города Омска // Администрация города Омска : [сайт]. – URL: <http://admomsk.ru/> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

23. Экология пойменных экосистем Иртыша : Сборник научных трудов / Омский государственный университет. – Омск, 2005. – 180 с.

24. Качества картофеля: как выбрать лучший сорт для вашего огорода // Тверь Агропром : [сайт]. – URL: <https://www.tveragroprom.com/blog/osnovnye-pokazateli-kachestva-kartofelya> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

25. Агротехника выращивания зерновых культур // СибзаводАгро : [сайт]. – URL: <https://sibzavodagro.ru/delimsya-opytom/agrotekhnika-vyrashchivaniya-zernovykh-kultrur> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

26. Роль Экологических Условий В Формировании Клейковины У

Яровой Пшеницы // КиберЛенинка : [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-ekologicheskikh-usloviy-v-formirovanii-kleykoviny-u-yarovoy-pshenitsy> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

27. Новые сорта мягкой яровой пшеницы с высоким потенциалом урожайности и качества зерна для использования // Омский АНЦ : [сайт]. – URL: <http://anc55.ru/wp-content/uploads/2023/06/rekom-novye-sorta-mjap-f-1.pdf> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

28. Содержание белка и клейковины в зерне яровой мягкой пшеницы в зависимости от накопления азота в растениях в условиях Оренбургского Приуралья // КиберЛенинка : [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-belka-i-kleykoviny-v-zerne-yarovoy-myagkoy-pshenitsy-v-zavisimosti-ot-nakopleniya-azota-v-rasteniyah-v-usloviyah-orenburgskogo> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

29. Система адаптивного земледелия Омской области // Омский АНЦ : [сайт]. – URL: https://anc55.ru/wp-content/uploads/2021/01/kniga-formatir-okonch-var-11-2_compressed.pdf (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

30. Предложения по повышению эффективности снегозадерживающих насаждений вдоль автомобильных дорог // Меганорм : [сайт]. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293854/4293854766.htm> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

31. Защитное лесоразведение в СССР. – Москва : Лесная промышленность, 1979. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/zashi/text.pdf> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

29.05.2024). – Текст : электронный.

32. Почвомелиоративная роль защитных лесонасаждений на юге Западной Сибири : диссертация ... доктора сельскохозяйственных наук // disserCat : [сайт]. – URL:

<https://www.dissercat.com/content/pochvomeliorativnaya-rol-zashchitnykh-lesonasazhdenii-na-yuge-zapadnoi-sibiri> (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

33. ФГБНУ "ОМСКИЙ АНЦ" // Audit-it.ru : [сайт]. – URL: https://www.audit-it.ru/contragent/1025500523960_fgbnu-omskiy-ants (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.

34. Титова, Т. В. Верификация данных о температуре приземного воздуха и осадках реанализа ERA5-Land по данным стационарных наблюдений в горах Южной Сибири / Т. В. Титова, И. А. Хромова // Лёд и Снег. – 2023. – Т. 63, № 2. – С. 216–230. – URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=ledsneg&y=2023&v=63&n=2&a=LedSneg2302016Titkova>. – Текст : электронный.

35. Prediction of Gross Primary Productivity Change in Central Asia Under Climate Change Using Deep Learning // ResearchGate : [сайт]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/390401968_Prediction_of_Gross_Primary_Productivity_Change_in_Central_Asia_Under_Climate_Change_Using_Deep_Learning (дата обращения: 29.05.2024). – Текст : электронный.