



Tempus



Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

***Т. Р. ЕРЁМИНА
Е. В. СОФЬИНА
И. ДАЙЛИДИЕНЕ***

**ОПЕРАТИВНАЯ
ОКЕАНОГРАФИЯ**

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2014

УДК: 551.46.06:519.6(216.224)

ББК 26.221 я73

Ерёмина Т.Р., Софьина Е.В. Дайлидиене И. Оперативная океанография. Учебное пособие. - СПб., изд. РГГМУ, 2014.- 99 с.

ISBN

Рецензенты: Альфредо Искуэдро Гонсалес, к.ф.-м. наук, научный сотрудник факультета морских наук и наук об окружающей среде, университет Кадиса, Испания; Георг Зодиатис, к.ф.-м. наук, зам.директора океанографического центра университета Кипра

Под редакцией д-ра физ.-мат. наук, проф. Л.Н. Карлина

В учебном пособии в сжатом виде излагаются вопросы организации оперативной работы по обеспечению потребителей морской гидрометеорологической информацией, обсуждаются современные океанографические системы, развитие непрерывных систем мониторинга в океане, описаны прогностические гидродинамические модели, процедура и основные подходы по усвоению данных наблюдений прогностическими моделями, создание информационной продукции.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по направлению “Прикладная гидрометеорология”, а также специализирующихся в области прикладных морских наук и рекомендовано учебно-методическим объединением вузов РФ по образованию в области гидрометеорологии.

This textbook represents a summary of problems of organization of operational work on provision of end-users with marine hydrometeorological information, including the discussion of modern oceanographic systems, development of continuous ocean monitoring systems, description of forecasting hydrodynamic models, procedure and basic approaches to data assimilation by forecasting models and information products.

The textbook is suitable for students and PhD students studying “Applied Hydrometeorology” and specializing in the area of Applied Marine Sciences, and is recommended by Academic Association of Universities for Hydrometeorology of the Russian Federation.

Издано при поддержке проекта eMaris TEMPUS.

ISBN

© Ерёмина Т.Р., Софьина Е.В., Дайлидиене И., 2014

© Российский государственный гидрометеорологический университет, (РГГМУ), 2014

© Университет Клайпеды, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление климата и связанные с этим возможное повышение уровня океана, возрастание риска возникновения опасных гидрометеорологических явлений и катастроф обусловили понимание необходимости создания оперативных систем наблюдений в море, дальнейшего развития методов и технологий прогнозирования. Интегрирование технологии математической модели совместно с обработкой и представлением данных наблюдений в удобной для пользователей форме при передаче их в режиме реального времени широко применяется и внедряется в практику работы гидрографических служб и агентств. Такие технологии получили название оперативной океанографии и стремительно развиваются последние два десятилетия. Создание и развитие оперативных океанографических систем позволяет обеспечивать безопасность на море, использовать такие системы при управлении морскими ресурсами и береговой деятельности, для предотвращения разливов нефти и нефтепродуктов, оперативного контроля за нефтяным загрязнением морских акваторий и распространением иных видов загрязнений, для изучения ледовых условий и контроля изменения климата.

Для того чтобы предотвратить или уменьшить ущерб от неблагоприятных условий погоды во всем мире разрабатываются системы раннего предупреждения опасных природных явлений, таких как цунами, тропические ураганы, штормовые нагоны и т.п. Ключевая роль в таких системах отводится оперативному обеспечению океанографическими данными и прогностической информацией [Абузяров, 2009]. Передача в оперативном режиме океанографической информации, создание прогностической продукции и доведение её до потребителя с использованием современных технологий позволяет оптимизировать хозяйственную деятельность на море и прилегающих побережьях. Развитие оперативных океанографических систем также направлено на обеспечение оперативной информацией лиц, принимающих решения, снижение рисков для жизни и здоровья людей в результате естественных и техногенных катастроф, сохранение морских экосистем и смягчение последствий изменения климата.

Информационной основой подготовки различных видов оперативной океанографической продукции является мониторинг параметров морской и воздушной среды, на основе которого строятся диагностические поля, используемые в дальнейшем для составления прогнозов характеристик морской среды Мирового океана. Для обеспечения нужд оперативной оке-

анографии необходимым является создание систем непрерывного мониторинга как всего Мирового океана, так и его внутренних, окраинных и шельфовых морей [Shiller и др., 2011].

Разработка прогностической продукции базируется на обширных массивах данных наблюдений в Мировом океане, накопленных за многие десятилетия. Для обеспечения управления, доступа и распространения данных оперативной океанографической информации, научной продукции и знаний на основе данных, полученных с океанографических судов, новых автоматических наблюдательных систем в морях и спутниковых наблюдений создаются национальные и международные центры хранения и обработки данных. Использование стандартов связи для передачи морских данных *in-situ* и спутниковой информации в режиме реального времени, а также новейшие достижения в информационных технологиях позволяют обеспечивать архивацию и сохранение данных для их использования при проведении научных исследований, расширяют возможности доступности существующих данных как для научного сообщества, так и для иных потребителей в целом. При этом использование общей процедуры проверки качества баз данных позволяет обеспечивать потребителей метаданными, данными и продукцией высокого качества.

В центрах приёма данных установлены мощные ЭВМ, позволяющие осуществлять усвоение (ассимиляцию) данных наблюдений прогностическими моделями. Результаты модельных расчётов используются для создания прогностической продукции, такой как предупреждения о прибрежных наводнениях, штормовых и ледовых условиях, цветении сине-зелёных водорослей и распространении загрязнений. Также создаются электронные карты, справочники, каталоги океанографической продукции, прогнозируются океанические течения, ветровые условия, уровень моря и др. Такая прогностическая информация довольно быстро передаётся потребителям.

В виду сложной экономической ситуации в 90-е годы в России намечалось отставание в области создания оперативных океанографических систем. Однако, экономический рост в 21 столетии и связанное с ним развитие морской деятельности в РФ обусловили необходимость развития новейших методов и технологий прогнозирования для морей России. Накопленный ранее огромный опыт проведения и организации измерений в морях и океанах, сохранение научного потенциала в области моделирования, а также возможности по использованию накопленного европейского опыта и существующих технологий благодаря участию российских учёных в европейских программах и проектах создали предпосылки к раз-

витию современных отечественных технологий в области оперативных океанографических систем.

В последние годы система оперативного океанографического обслуживания в России совершенствуется в рамках реализации подпрограммы «Единая система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) федеральной целевой программы «Мировой океан»». В этой подпрограмме одним из основных является оперативный модуль, в основу которого заложены технологии создания и распространения разнообразной диагностической и прогностической продукции глобального и регионального характера с использованием современных ЭВМ, ГИС-технологий и средств телекоммуникации [Абузьяров, 2009].

Отдельные компоненты оперативной подсистемы ЕСИМО уже внедрены в оперативную практику научно-оперативных учреждений Росгидромета и морских УГМС. Введён в эксплуатацию Web-портал ЕСИМО (<http://www.oceaninfo.ru>), обеспечивающий удаленный поиск и доступ к информационным ресурсам отечественных и зарубежных источников оперативной информации, массивов и баз данных по предметной области ЕСИМО, в т.ч. прогностической продукции и данных.

Таким образом, оперативная океанография включает в себя широкий спектр задач: создание непрерывных систем мониторинга, гидродинамическое моделирование динамики вод, оперативная передача данных и усвоение прогностическими моделями, хранение и обработку данных наблюдений, преобразование расчётных данных к виду, удобному пользователям (визуализация), создание информационной продукции, каждая из которых является отдельной областью знаний.

Целью настоящего учебного пособия является знакомство с современными океанографическими системами. В сжатом виде излагаются вопросы организации оперативной работы по обеспечению потребителей прогностической продукцией. Дается описание основных программ и проектов, действующих в рамках международного сотрудничества в оперативной океанографии. Особое внимание в пособии уделяется численным моделям для прогноза состояния моря, распространения загрязнений, способам ассимиляции данных наблюдений. Дается представление о Российской единой системе информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) и современных европейских региональных прогностических системах.

Пособие предназначено для студентов (бакалавров и магистров), обучающихся по направлению «Прикладная гидрометеорология», профиль

«Прикладная океанология» и специализирующихся по промысловой океанологии, прикладным морским наукам и КУПЗ.

Учебное пособие подготовлено в рамках международного проекта e-Maris программы ТЕМПУС.

ГЛАВА 1. ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОГРАФИЯ: ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

1.1. Оперативная океанография – основные положения

Оперативная океанография является одним из прикладных разделов общей океанографии. Её развитие тесно связано с внедрением новых методов измерений в море, совершенствованием численных моделей, разработкой современных технологий передачи и усвоения данных, развитием телекоммуникационных средств. Отличительной особенностью оперативной океанографии является то, что стимулирование развития этой области морских наук принадлежит международным организациям, таким как Всемирная метеорологическая организация (ВМО), Межправительственная океанографическая комиссия (МОК) и др., деятельность которых направлена на развитие океанографического обслуживания.

Существуют различные подходы к определению «оперативная океанография». В настоящее время определения «оперативная» и «научная» океанография не являются общепринятыми. Это связано, главным образом, с разграничением в различных странах научно-исследовательской и оперативной деятельности в зависимости от существующих структур управления и финансирования в каждой стране. В качестве общего принципа международными экспертами установлено, что «оперативная» океанография обычно характеризует мероприятия, ведущие к более эффективному прогнозированию состояния океана. Таким образом, оперативная океанография обеспечивает основную инфраструктуру для работы служб, отвечающих за обеспечение оперативной информацией потребителей.

Одно из определений оперативной океанографии приведено в [Euro GOOS website]. Согласно этому определению оперативная океанография – *это систематические и долгосрочные регулярные измерения характеристик морей, океанов и атмосферы, а также их быстрая интерпретация и распространение.*

Важными продуктами, получаемыми благодаря оперативной океанографии, являются:

- текущие прогнозы (наукастинг), предоставляющие наиболее точное описание современного состояния моря, включая живые ресурсы;
- прогнозы, обеспечивающие непрерывные сведения о будущем состоянии моря, максимально долгосрочные;

- ретроспективные прогнозы (hindcasts), объединяющие многолетние ряды данных, которые дают информацию для описания прошлых состояний, а также временные ряды, показывающие тренды и изменения.

Оперативная океанография обычно представляет собой быструю передачу данных наблюдений в центры ассимиляции данных. Там мощные компьютеры обрабатывают данные, используя числовые прогнозные модели. Результаты моделирования используются для создания продуктов с данными, часто через посреднические организации, добавляющие стоимость. Примеры конечных продуктов включают в себя оповещения (о прибрежных наводнениях, повреждениях, наносимых льдом и штормами, опасных цветениях воды, поступлении загрязняющих веществ и т.д.), электронные карты, оптимальные маршруты для судов, прогнозы сезонной или годовой первичной продуктивности, океанических течений, изменчивости климата океана и т.д. Конечные продукты и прогнозы должны быть оперативно распространены промышленным пользователям, правительственным учреждениям и контролирующим органам.

На рис. 1.1 приведена схема функционирования оперативной системы, включающей в себя различные способы и технические средства проведения измерений в море, спутниковые данные и моделирование с целью получения прогноза.

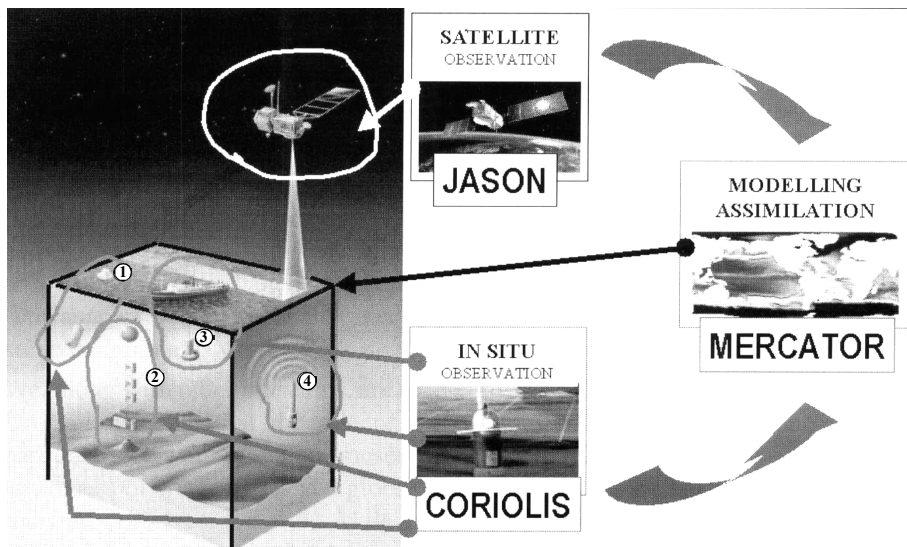


Рисунок 1.1. Схема работы оперативной системы [Building the European Capacity in Operational Oceanography]

Передовые методы оперативной океанографии, использующие самые современные доступные технологии, (i) расширяют возможности числовых моделей рассчитывать и предсказывать динамику и функционирование морской среды максимально близко к действительности, а также (ii) извлекают информацию и производят полезные применимые знания путём интегрирования данных в различных географических и временных масштабах и в разных секторах.

Специализированное числовое моделирование нацелено на различные динамические и функциональные аспекты морской среды. Данные и информационные услуги применяются во многих сферах, включая экологический мониторинг, оценку и смягчение рисков, развитие морской научно-обоснованной политики и стратегическое планирование, изменение климата, устойчивое управление ресурсами мирового океана, морские отрасли промышленности и появляющиеся проблемы в морском секторе.

Также, продукция оперативной океанографии используется в процессе ОВОС (оценка воздействия на окружающую среду), которая реализуется на месте стыка научных, экологических, юридических и социально-экономических аспектов, и фокусируется на использовании и интеграции многочисленных рядов данных для получения лучших оценок.

В оперативной океанографии осуществляется наблюдение и прогноз физических характеристик морской среды, однако последние десятилетия биологические показатели также стали входить в состав оперативной продукции, как представляющие интерес с научной и экономической точек зрения. Биологические процессы, такие как развитие фитопланктона, влияние на круговорот углерода и проникновение света и тепла в глубины приповерхностного слоя океана, биологическая продуктивность, качество воды, здоровье населения – важнейшие показатели состояния прибрежных зон, которые испытывают антропогенные воздействия.

1.2. Глобальные и региональные оперативные океанографические системы

Стремительное развитие оперативной океанографии связано с созданием в 1990 году Глобальной системы наблюдений за океаном (ГЧНО, англ. сокр. GOOS, Global Ocean Observing System) [European Operational Oceanography]. Это система по координации международных программ, каждая из которых работает в различных дополняющих друг друга направлениях с целью поддержания постоянного и устойчивого функционирования

глобальных сетей наблюдений в океане. Основные цели и задачи ГСНО направлены на удовлетворение растущих потребностей различных потребителей по качеству, количеству и оперативности океанографической информации и включают в себя [European Operational Oceanography]:

- Мониторинг, изучение и предсказание погоды и климата;
- Описание и прогноз состояния океана, включая живые ресурсы;
- Совершенствование управления морскими и береговыми экосистемами и ресурсами;
- Сокращение ущерба от естественных опасностей и загрязнения;
- Защита жизни и собственности на берегах и в море;
- Стимулирование научных исследований.

Основными пользователями, заинтересованными в ГСНО являются: администрации прибрежных районов, национальные океанографические и метеорологические службы, гидрографические службы, морские и прибрежные предприятия, морской транспорт, политики и заинтересованное население.

В систему ГСНО входят два модуля: глобальный и прибрежный. Основная задача глобального модуля – выявление крупномасштабных изменений в океане и оценка их влияния на климат. Задача прибрежного модуля – оценка влияния крупномасштабных изменений на прибрежные регионы, включая экосистемы. Для выполнения задач прибрежного модуля создаются региональные системы ГСНО, которые объединяются в глобальную сеть прибрежных наблюдений и управления данными.

В 1994 году для развития оперативной океанографии в европейских морях и прилегающих к ним частях океанов был создан европейский модуль ЕвроГСНО. В региональную структуру ЕвроГСНО были включены 5 регионов: 1) Атлантический океан; 2) арктические моря; 3) Балтийское море; 4) шельф Северо-Западной Европы; 5) Средиземное море. Эти районы Мирового океана значительно отличаются своими океанологическими характеристиками, степенью изученности и экономическим положением. Каждая региональная система призвана способствовать решению задач ГСНО в своем регионе. Распределение региональных систем показано на схеме (рис. 1.2).

ЕвроГСНО осуществляет регулярную передачу информации в комитет ГСНО. В настоящее время в состав ЕвроГСНО входят 36 организаций из 16 европейских стран. Члены ЕвроГСНО взаимодействуют между собой для создания единого подхода к решению следующих задач: выделение приоритетов европейской оперативной океанографии, сти-

мулирование развития научной, технической и вычислительной баз для вычислительной океанографии и её внедрения в практику служб и агентств, оценка экономической эффективности от использования прогностической продукции.

Деятельность ЕвроГСНО направлена на содействие по планированию деятельности ГСНО, а также продвижению на национальном, европейском и всемирном уровнях. Вместе с тем, важнейшей задачей Евро ГСНО является продвижение европейской оперативной океанографии в ГСНО; стимулирование развития европейских и региональных служб оперативной океанографии с учётом модулей ГСНО: 1) прибрежная зона; 2) здоровый океан; 3) живые морские ресурсы; 4) климат; 5) морские службы; создание единого процесса обработки данных, включая контроль качества и управление данными; стимулирование исследований и развитие технологий, которые позволят решать проблемы оперативной океанографии.

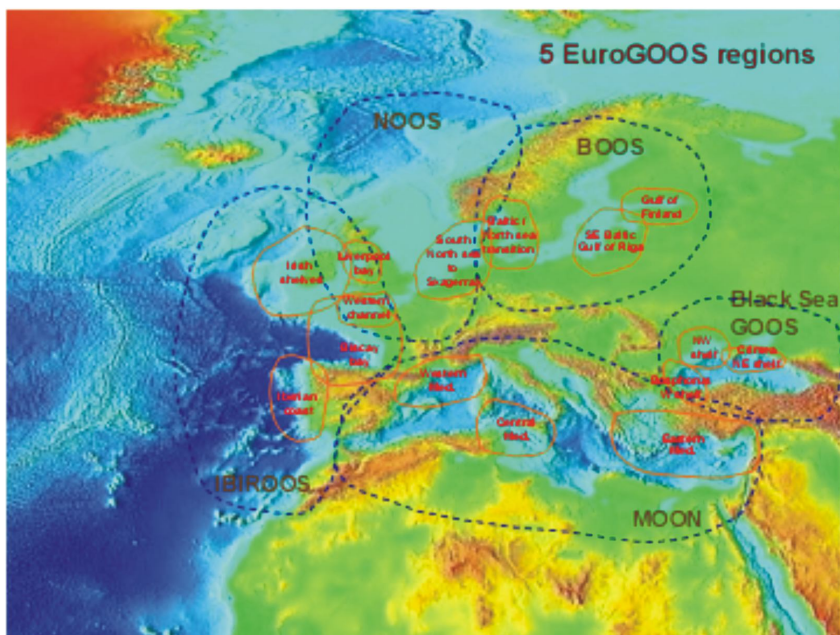


Рисунок 1.2. Европейские региональные (синие пунктирные линии) и прибрежные (красные линии) системы. BOOS – Балтийская оперативная океанографическая система, NOOS- оперативная океанографическая система наблюдений за океаном Северо-западного Шельфа; MOON- Средиземноморская оперативная океанографическая сеть; IBIROOS- Ирландская, Бискайская, Иберийская региональная оперативная океанографическая система; Black Sea GOOS- Черноморская ГСНО

Деятельность ЕвроГСНО направлена на получение максимальной экономической эффективности при эксплуатации существующих систем, а также от их внедрения в более крупные системы ГСНО.

ГСНО предполагает создание, поддержку и вовлечение в программу региональных научных и исследовательских коллективов для организации и проведения наблюдений за морем. Помимо европейского модуля в ГСНО также включены регионы Северо-Восточной Азии, Африки, Карибского моря, Австралийская, Арктическая ГСНО и др.

ГСНО является компонентом Глобальной системы наблюдений за системами Земли, которая объединяет в себя наблюдения за всеми природными системами на планете, включая морские.

ГСНО поддерживается и финансируется такими организациями как:

- Международный океанографический комитет (МОК)
- Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО)
- Программа организации объединенных наций по окружающей среде (ЮНЕП)

- Международный совет научных объединений (МСНО). (International Council of Scientific Unions (ICSU)).

Координация участия российских организаций в ГСНО осуществляется Национальным океанографическим комитетом (НОК) Российской Федерации. На современном этапе российские организации обеспечивают вклад в развитие существующих систем наблюдений и обмена данными: попутные наблюдения с судов, Глобальная система наблюдений за уровнем моря (ГЛОСС), Международный обмен океанографическими данными и информацией (МООД), спутниковые системы, а также развитие региональных проектов ГСНО в Черном, Балтийском и дальневосточных морях.

1.3. Основные международные программы и проекты в оперативной океанографии

Оперативные океанографические системы для различных частей Мирового океана начали развиваться в 80-е годы прошлого столетия при поддержке ВМО. В деятельности, связанной с развитием оперативного океанографического обслуживания, ВМО активно сотрудничает с Межправительственной океанографической комиссией, Международной морской организацией (ММО) и др. Так, в 1999 году в рамках сотрудничества ВМО и МОК была создана Совместная техническая комиссия ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии (СКОММ, англ.

сокр. JCOMM). SKOMM – это межправительственная организация экспертов, которая обеспечивает координирование, регулирование и управление системами океанографических и морских метеорологических наблюдений, обмена данными и обслуживания потребителей. Одной из основных целей этой организации является развитие оперативной океанографии на основе Глобальных систем наблюдений за океаном и климатом. Деятельность SKOMM реализуется в рамках четырёх программных областей: 1) обслуживание; 2) наблюдения; 3) управление данными; 4) образование, подготовка кадров и наращивание потенциала. Одной из основных задач программной области «Обслуживание» является поддержка систем морской безопасности, предупреждений об опасных явлениях, уменьшение последствий катастроф. Для обеспечения потребителей оперативной метеорологической и океанографической информацией был создан Электронный бюллетень продукции SKOMM. Потребители с помощью современных Web-технологий могут получать и представлять в удобном для себя виде различную информацию [Абузьяров, 2009].

Большую роль в развитии систем наблюдений в океане и его регионах сыграли два пилотных проекта, выполненных под эгидой ГСНО: Глобальный эксперимент по усвоению океанических данных (ГОДАЭ) и проект АРГО.

Проект ГОДАЭ был направлен на сбор и усвоение данных наблюдений in-situ и спутниковых данных в глобальных океанических моделях в реальном масштабе времени. Основным результатом проекта должно было стать воспроизведение в синоптическом масштабе океанической циркуляции с высоким пространственным разрешением - несколько десятков километров.

Проект АРГО предусматривал выпуск в Мировом океане 3000 дрейфующих ныряющих буйев для измерения профилей температуры и солёности до глубин 2000 м. В выполнении проекта принимали участие более 30 стран, включая Россию. Первый буй был запущен в 2000 году, и к 2007 году общее количество буйев в Мировом океане достигло 3000, что позволяет получать ежегодно более 100000 профилей температуры и солёности. Это примерно в 20 раз больше, чем ежегодное количество аналогичных измерений с судов. Информация АРГО внесла ценный вклад в диагноз и прогноз изменений уровня Мирового океана, в изучение тропических циклонов и тайфунов, в развитие долгосрочных прогнозов погоды.

Развитие оперативных океанографических систем поддерживается через финансирование научных проектов. К наиболее крупным за послед-

нее десятилетие можно отнести такие европейские проекты как ЕСООР – оперативная система наблюдений и прогноза для европейских прибрежно-шельфовых морей, My-Ocean и MyOcean 2 (www.gmes.info/pages-principales/projects/marine-projects/myocean), основной задачей которых является объединение существующих европейских и региональных систем оперативного наблюдения и прогноза в единую интегрированную пан-Европейскую систему. Оба проекта финансируются Европейской Комиссией (7-ая рамочная программа). В проектах принимают участие европейские национальные метеорологические и гидрографические службы, Агентство по окружающей среде (European Environment Agency), Агентство морской безопасности (European Maritime Safety Agency), научно-исследовательские институты, европейские центры данных, такие как Mercator Ocean, коммерческие организации, работающие в области создания программного обеспечения, университеты и др.

Основными задачами, решаемыми в рамках проектов ЕСООР и My Ocean, объединивших более 70 участников в ЕСООР и 59 участников из 28 стран в проекте MyOcean, является обеспечение высококачественной информацией по всему океану (глобальный масштаб) и европейским шельфовым морям (региональный масштаб), основанной на комбинации дистанционных и *in situ* измерениях совместно с 3-х мерными гидродинамическими моделями, с помощью которых осуществляется восстановление характеристик на глубоководных горизонтах, обеспечение краткосрочными прогнозами и прогнозами изменений состояния морской среды, восстановление предшествующего состояния морей за последние 20 лет. Одной из задач проектов является обеспечение передачи информации в режиме реального времени и её доступности потребителю (рис. 1.3).

Следует отметить, что “доставка” прогностической продукции потребителю (заказчику) является важнейшим звеном оперативной системы, поскольку несвоевременное или неполное уведомление заказчика может привести к значительным финансовым потерям и даже человеческим жертвам. Интернет является возможным каналом для передачи данных, однако, при его использовании возникают угрозы как качеству, так и безопасности передачи данных, а в некоторых случаях Интернет невозможно установить или поддерживать. Поэтому для быстрой и надёжной передачи прогностической информации и данных необходимо использовать иные возможности средств телекоммуникации - спутниковые и теленавигационные системы.

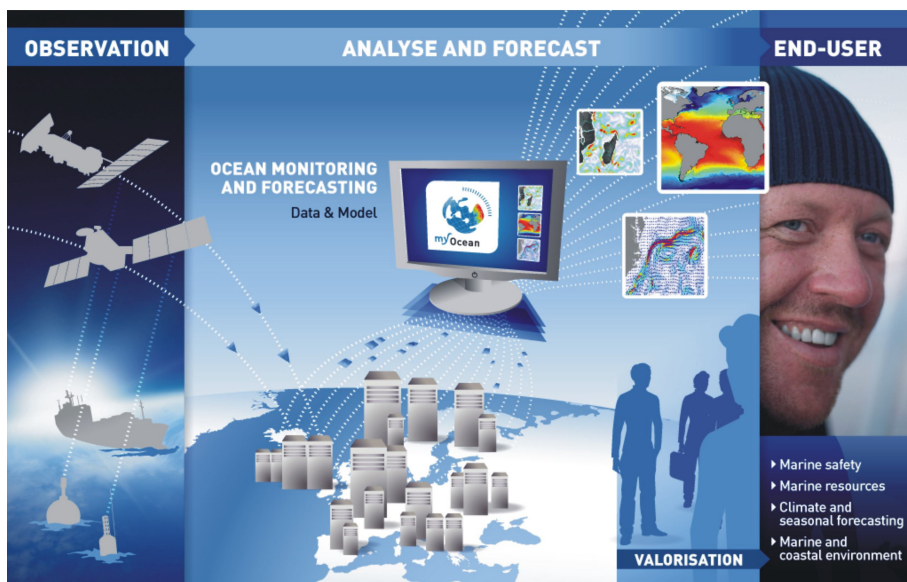


Рисунок 1.3. Основные элементы новой пан-Европейской службы в рамках проекта MyOcean: наблюдения, анализ и прогноз (данные и модель), конечный потребитель, экономическая эффективность (<http://www.myocean.eu>)

Одним из важнейших результатов проекта MyOcean2 является создание каталога продукции для различных потребителей, который включает в себя более 100 различных видов океанографической информации о состоянии вод Мирового океана и его различных регионов. Информация размещена на сайте проекта <http://www.myocean.eu> и включает в себя сведения об уровне и температуре поверхности океана, ледовом покрытии, ветровом режиме. В каталоге продукции представлены результаты анализа биогеохимических характеристик Мирового океана в виде 3-х мерных полей на стандартной сетке 1/2 град. и с 50-ю уровнями по вертикали; еженедельно обновляемые результаты анализа и прогноза 3-х мерных полей физических характеристик вод Мирового океана, результаты реанализа физических полей в глобальном масштабе за период 1993-2011 гг. и многое другое (рисунок 1.4).

Аналогичная продукция создана для морей и отдельных регионов Мирового океана.

Проект MyOcean тесно связан с ГСНО, ЕвроГСНО, а также с проектами, направленными на создание крупнейших центров данных, таких как EMODnet и SeaDataNet.

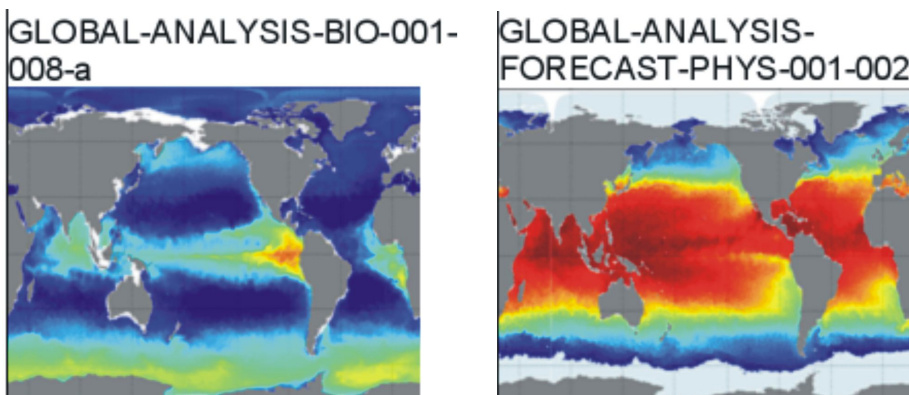


Рисунок 1.4. Пример результатов анализа биогеохимического анализа вод Мирового океана (а); глобального анализа и прогноза физических характеристик океана (б)

Конечной целью проекта MyOcean2 является создание пан-Европейской структуры (службы) для мониторинга и прогноза состояния океанов и морей, которая позволит странам обеспечивать безопасность на море, использовать океанографическую систему при управлении морскими ресурсами и береговой деятельностью, для предотвращения разливов нефти и контроля изменения климата, изучения ледовых условий, качества воды и распространения загрязнений.

1.4. Наблюдательные системы в Мировом океане

Наблюдения за океаном поступают из различных источников, которые включают спутниковые измерения, платформы для наблюдений in-situ, такие как поверхностные и подповерхностные буи и поплавки, а также попутные суда (рис. 1.5).

В настоящее время в развитии наблюдательных систем отмечаются две основные тенденции [Абузьяров, 2009]:

- автоматизация традиционных контактных способов измерения параметров морской среды;
- внедрение новых средств дистанционных измерений параметров морской среды (спутники, радары) .

Поступающие данные используются в трёх основных аспектах:

- для оперативной подготовки диагностических и прогностических материалов, необходимых для гидрометеорологического обслуживания морской деятельности;

– для выполнения научных исследований в области разработки и верификации моделей, методов и технологий расчёта и прогноза основных параметров морской природной среды;

– для получения необходимых расчётных параметров, используемых при проектировании судов, различных гидротехнических сооружений, портов, платформ и т.д.

Данные наблюдений должны отвечать некоторым общим требованиям, основными из которых являются: глобальность, трёх- мерность, комплексность, точность, синхронность, регулярность и оперативность. Важно, чтобы все перечисленные требования выполнялись в совокупности, так как нарушение одного из них снижает ценность других. [Абузьяров, 2009]

Основные системы наблюдений в Мировом океане условно можно разделить на три категории:

– глобальные - покрывают весь океан (буи АРГО, альтиметрия); измеряемые параметры: температура поверхности океана (ТПО), профили температуры и солёности, уровень, течения;

– региональные - для мониторинга отдельных явлений (например, для обнаружения Эль-Ниньо используются буи ТАО/TRITON/PIRATA, арктические буи для мониторинга льда и др.); временные масштабы – от часов до дней;

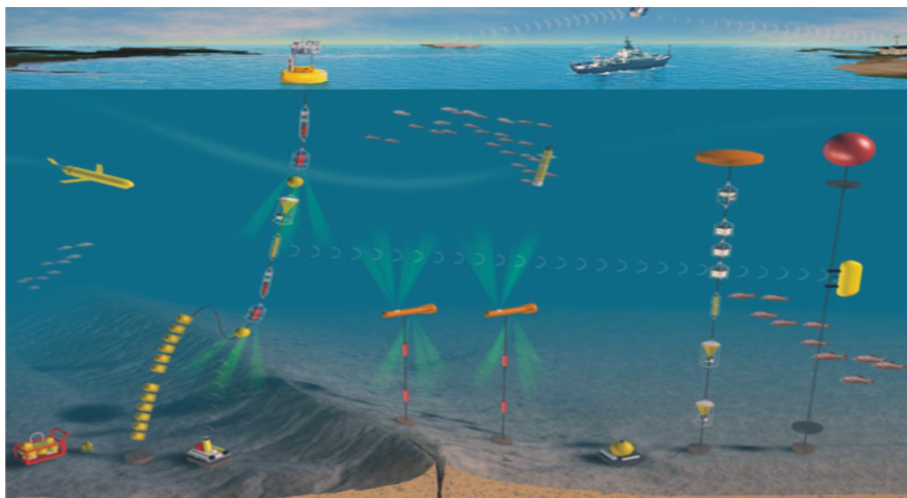


Рисунок 1.5. Современные измерительные системы в прибрежной зоне
(Ocean Observatories, Oceanus, 2006.

<http://ioi.research.um.edu.mt/cms/msc/index.php/2-uncategorised/>)

– прибрежные - мониторинг качества вод, наблюдения за ветром, волновым режимом и приливами в районе портов, радарная информация для мониторинга течений и волнения на расстоянии от 10 до 100 миль.

Для управления данными организованы глобальные центры данных. В настоящее время существует два глобальных Центра данных АРГО: в Монтерее (США) и в Тулузе (Франция). Национальные центры данных имеют все страны-участницы проекта (США, Франция, Великобритания, Канада, Австралия, Германия, Япония, Южная Корея). Все данные по проекту АРГО объявлены свободно доступными мировому сообществу (через мировую сеть GST). Полные наблюдения, прошедшие контроль (с задержкой по времени), доступны через национальные центры данных АРГО с задержкой до 5 месяцев.

В СКОММ создана Программная Область Наблюдений (ПОН), которая прежде всего ответственна за развитие, координацию и обслуживание якорных буйев, дрейфующих буйев, сетей наблюдений с судов и из космоса, а также соответствующих телекоммуникационных средств. Она также контролирует эффективность всеобщей системы наблюдения и, по мере необходимости, рекомендует и координирует изменения, разработанные для улучшения системы. Она также унаследовала главную ответственность за многие важные и хорошо известные программы наблюдений, которыми управляют органы, отчитывающиеся через СКОММ (<http://www.jcomm.info>). Созданный в СКОММ центр поддержки платформ наблюдений *in situ* регулярно обновляет карты сети наблюдений в режиме реального времени (рис. 1.6).

Данные дрейфующих ныряющих буйев АРГО обновляются ежедневно, буйковые данные и данные судов - ежемесячно и хранятся в базе данных центра поддержки.

Кроме того, создан Центр мониторинга сети наблюдений (ЦМСН) – Интернет-инструмент для помощи менеджерам системы наблюдения и учёным осуществлять мониторинг производительности глобальной системы *in situ*-наблюдений за океаном, идентифицировать проблемы в режиме, близком к реальному времени и оценивать адекватное поведение системы (рис. 1.7).

Начиная с 1970 года для наблюдений в океане начали активно использоваться спутники. В настоящее время для получения различной спутниковой информации используются спутниковые системы NOAA, METEOSat, EUMETSAT, JANSO-1, JANSO-2, ENVISAT и др.

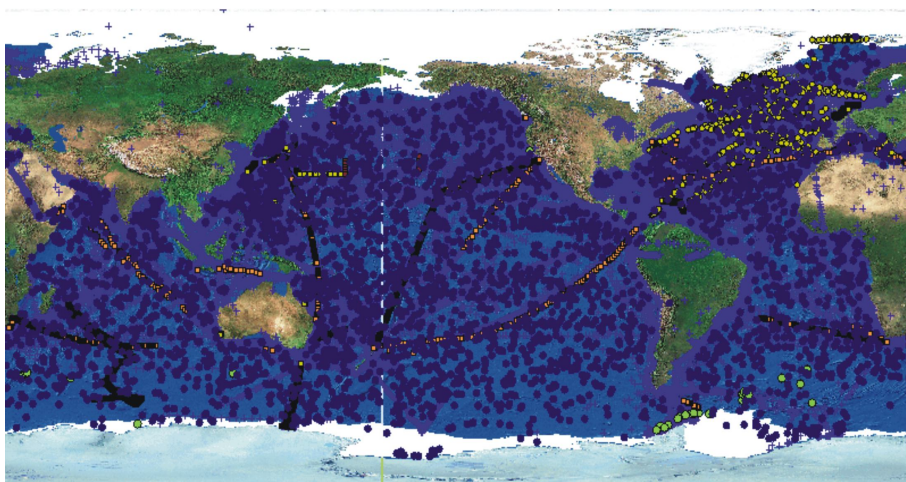


Рисунок 1.6. Карта состояния сети, полученная из Карты состояния сети JCOMM/GOOS от JCOMMOPS и сгенерированная с использованием запроса Web Map Service (Сервис Интернет-карт).

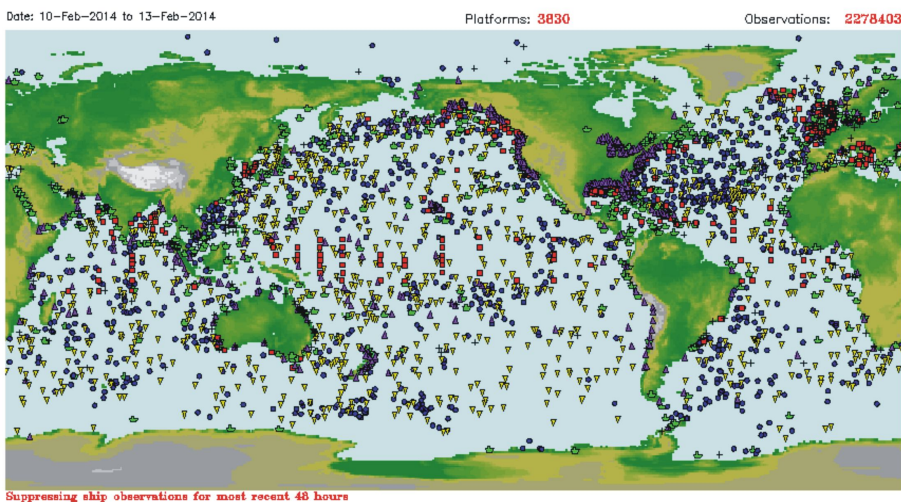


Рисунок 1.7. Наблюдательные платформы, сообщающие данные за прошедшие три дня из ЦМСН

К наиболее важным видам оперативной спутниковой информации относятся следующие:

- альтиметрия – необходима для определения поверхностных течений в открытом океане и их мезомасштабной изменчивости;

– термическая радиометрия – позволяет с высоким разрешением определять поле температуры поверхности океана, включая океанские фронты и вихри;

– видимая спектрометрия – на основе измерений цвета океана позволяет получать данные по хлорофиллу и используется в морских биогеохимических моделях.

Спутниковые радиолокационные данные (рис. 1.8) оказывают большую помощь в чрезвычайных ситуациях, связанных с проводкой судов в тяжёлых ледовых условиях и освобождением судов из ледового плена в Арктике и Антарктиде. На основе анализа радиолокационных ледовых карт руководителями морских операций принимаются решения по управлению судами и ледоколами во льдах Арктики и Антарктиды.

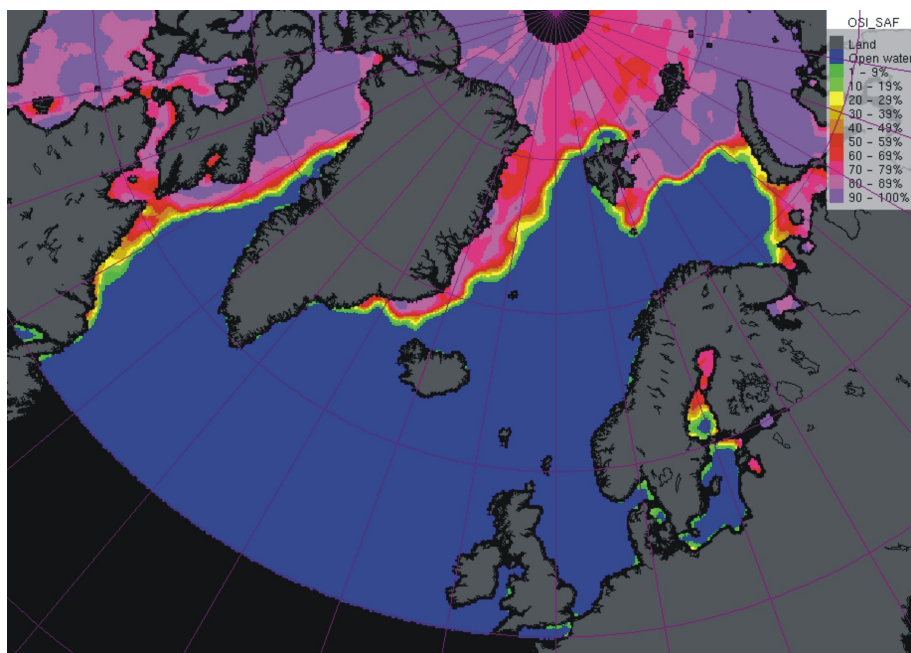


Рисунок 1.8 Спутниковые наблюдения концентрации льда

1.5. Организация океанографического обслуживания в России

Структура современной системы оперативного обеспечения морских отраслей экономики состоит из трёх подсистем:

- подсистемы морских гидрометеорологических наблюдений наземного и космического базирования;

- подсистемы сбора, обработки, передачи и хранения морской гидрометеорологической информации и данных;

- подсистемы интерпретации и доведения морской гидрометеорологической информации до потребителя.

Оперативное океанографическое обслуживание основывается:

- на материалах гидрометеорологических наблюдений;

- на знании гидрометеорологического режима моря;

- на детальном анализе условий формирования гидрологических явлений;

- на научно обоснованных методах диагноза и прогноза морских гидрологических элементов и явлений.

Система оперативного океанографического обслуживания должна быть скоординирована на национальном и международном уровнях и направлена на удовлетворение оперативных и научно-исследовательских потребностей. Она должна в максимально возможной степени использовать наиболее современные технологии наблюдений, телесвязи и методы обработки данных. Отдельные элементы системы должны планироваться и осуществляться в соответствии с международными обязательствами России.

Служба морских гидрометеорологических прогнозов в системе Росгидромета представляет собой распределенную систему, включающую ряд учреждений:

- Государственное учреждение «Гидрометцентр России», являющийся головным учреждением в области гидрометеорологических прогнозов, одновременно выполняющий функции Мирового метеорологического центра (ММЦ);

- институты Росгидромета морского профиля: ААНИИ, ГОИН, ДВНИ-ГМИ, ВНИИГМИ-МЦД, КаспМНИЦ;

- межрегиональные территориальные органы управления и подведомственные им центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

В задачу этих учреждений входит:

- сбор и обработка данных наблюдений;

- подготовка и выпуск краткосрочных (до 72 ч), среднесрочных (до 10 сут) прогнозов;

- подготовка долгосрочных (от месяца до года) и сверхдолгосрочных прогнозов (на сроки более года);

- создание научно-методической базы оперативного обеспечения метеорологическими и океанографическими данными и информацией о загрязнении морской природной среды;
- развитие систем регулярного мониторинга состояния морской и воздушной среды (космического и наземного базирования);
- интеграция имеющихся и вновь создаваемых ресурсов для развития оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности;
- обеспечение информационного взаимодействия с различными ведомствами на основе современных телекоммуникационных и компьютерных средств;
- обеспечение доступа пользователей ко всей совокупности информационного фонда по Мировому океану;
- развитие и стандартизация средств информационного обслуживания потребителей (пользователей) данными и информационной продукцией (анализы, прогнозы) о состоянии и загрязнении Мирового океана и прибрежных территорий;
- обмен информационными данными в рамках международного сотрудничества, а также участие в международных программах;
- организация четкого взаимодействия с потребителями (пользователями) гидрометеорологической информации, включая маркетинг потребностей рынка в морских гидрологических прогнозах.

Бюро погоды являются основной оперативной единицей территориальных УГМС. Они ответственны за подготовку прогнозов и предупреждений об опасных явлениях (ОЯ) по своим зонам ответственности.

1.6. Единая система информации об обстановке в Мировом океане

Единая система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) предназначена для комплексного информационного обеспечения морской деятельности России. Основное направление развития ЕСИМО – это интеграция и рациональное использование ресурсов и средств уже существующих в России ведомственных информационных систем. В работах по созданию ЕСИМО участвуют более 30 организаций из 15 министерств и ведомств России

Одним из центров ЕСИМО является ГУ «Гидрометцентр России», который служит основой оперативного модуля ЕСИМО и осуществляет де-

тельность в области подготовки и распространения оперативной диагностической и прогностической информации о состоянии атмосферы и морской среды. Производимая центром информационная продукция предназначена для широкого круга пользователей ЕСИМО в целях обеспечения хозяйственной, оборонной и других видов деятельности в океанах и морях. Предоставление информации потребителям производится непосредственно из центра и через систему распределенных баз данных ЕСИМО.

Информационную основу деятельности центра составляют оперативные данные наземной и спутниковой наблюдательной системы и результаты их обработки в крупных метеорологических центрах. Эта информация распространяется по Глобальной системе телесвязи (ГСТ) ВМО, автоматизированной системе передачи данных и сети Интернет.

Оперативная продукция – информация о текущем состоянии морской среды и прогнозе её развития – строится на базе использования систем объективного анализа и усвоения гидрометеорологических данных, прогностических расчётов по гидродинамическим моделям, работающим в оперативном режиме. В технологическом отношении деятельность центра состоит в реализации информационно-вычислительной системы, действующей в автоматизированном режиме и обеспечивающей регулярный выпуск и распространение регламентированной оперативной продукции ЕСИМО.

Основная деятельность центра связана с разработкой, сопровождением и развитием технологических линий, предназначенных для выпуска соответствующей информационной продукции.

В функциональном отношении технологии подготовки и распространения оперативной диагностической и прогностической гидрометеорологической информации по Мировому океану и неарктическим морям России обеспечивают:

- диагноз и прогноз параметров приводного слоя Мирового океана с локализацией для морей России;
- глобальный прогноз параметров ветрового волнения;
- глобальный анализ температуры поверхности океана;
- анализ параметров Мирового океана на основе системы усвоения океанографических данных;
- прогноз уровня и течений в Каспийском море;
- прогноз ледовых условий для неарктических морей России;
- оценку опасных штормовых условий для акватории морей России.

Для объективизации степени опасности штормовых условий введены три градации скорости ветра: менее 15 м/с, 15–20 м/с («жёлтый» уровень

опасности) и более 20 м/с («красный» уровень). В качестве исходной информации используется прогноз скорости приводного ветра на высоте 10 м, выпускаемый метеорологическим центром NCEP/NOAA. Прогностические поля этого центра имеют высокое пространственное разрешение (около $0,3^0$); прогноз рассчитывается четыре раза в сутки. Сведения об опасных штормовых условиях предоставляются пользователям ЕСИМО для 9 морей России.

ГЛАВА 2. ОПЕРАТИВНЫЕ ПРОГНОЗЫ СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ

2.1 Гидродинамический прогноз состояния океанов

В современных оперативных прогностических системах реализовано интегрирование технологии математической модели совместно с процедурным усвоением данных наблюдений, обработкой и представлением прогностической информации в удобной для пользователей форме при передаче их в режиме реального времени. Гидродинамические модели служат основой прогноза гидрофизических характеристик морской среды, распространения загрязнений. Общим подходом в развитии прогностических систем в настоящее время является интегрирование гидродинамических моделей атмосферы, циркуляции океана, ветрового волнения и др. В последние годы всё чаще в модельные комплексы включают модели переноса и трансформации нефтяных загрязнений, экосистемные модели.

Для повышения качества прогноза в оперативных прогностических системах используется процедура усвоения (ассимиляции) математической моделью данных наблюдений. Основной задачей метода ассимиляции данных является адаптация состояний физических имитационных моделей к наблюдаемым данным. Тем самым предоставляются хорошие начальные условия для нелинейной модели и для интерактивной оценки параметров модели. Процедура «ассимиляции» является существенным компонентом оперативного прогнозирования, она привлекается для улучшения прогностических качеств численной модели, путём постоянно возобновляемых прогнозов, основанных на разнице между предыдущими прогнозами и недавно полученными данными.

2.1.1. Гидродинамические модели циркуляции океана и ледовых процессов

Океанские течения обычно изучаются с использованием так называемой Модели общей циркуляции МОЦ (General Circulation Model). МОЦ используются для моделирования как атмосферы, так и океана. Они составляют ядро моделей прогноза погоды и климатических моделей. Крупномасштабные волновые процессы, такие как приливные волны, обычно хорошо воспроизводятся МОЦ, тогда как другие явления как, например, ветровые поверхностные волны обычно требуют специальных моделей

волн для получения реалистичного представления физических процессов. И хотя мы в дальнейшем, главным образом, сосредоточимся на моделях океана, важно иметь в виду, что процессы в океане и, в особенности, движения в зоне контакта океана с атмосферой не могут рассматриваться отдельно от того, что происходит в самой атмосфере [T.Soomere, 2013].

Несмотря на существующие возможности вычислительной гидродинамики (ВГД), необходимо особо подчеркнуть, что наша способность моделировать движение жидкости не уменьшает важность более традиционных методов, включающих теоретическую и экспериментальную работу, а также регистрацию данных *in situ* и с помощью дистанционных методов.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований требуются для проведения контрольных испытаний, т.е. значения, которые ВГД-моделирование должно воспроизводить, демонстрируя, что физические свойства модели представлены корректно. Такие упражнения являются частью процедуры валидации (проверки) модели и необходимы для идентификации ошибок в модели и калибровки её параметров.

Когда делается заключение о том, что модель даёт результаты с приемлемой точностью и надёжностью, расчёты могут использоваться для предоставления информации, которую невозможно получить с помощью других методов, например, для заполнения промежутков в данных полевых измерений, анализа сценариев течений, которые являются слишком сложными для теоретического исследования, или для прогноза вероятных будущих событий. Многим учёным и инженерам не нужно будет приобретать навыки разработки ВГД-моделей, но так как использование методов ВГД расширяется во все новые области науки и прикладных исследований, вероятно, больше людей осознает необходимость работы с данными моделирования или даже заниматься самим ВГД-моделированием. Поэтому так важно и для неспециалистов иметь некоторое представление о том, что происходит в коде ВГД, и какие существуют возможности и ограничения у этих моделей.

Наиболее важным признаком, позволяющим классифицировать трёхмерные гидротермодинамические модели океана, является представление в них локального вертикального направления, определяемого силой тяжести. В настоящее время существует 3 основных представления вертикальной координаты, однако ни одно из них не является универсальным.

Простейший выбор вертикальной координаты – это *z*-координата, представляющая собой расстояние от покоящейся водной поверхности

$z = 0$ и направленная вверх так, что дно представляется как $z = -H(x, y)$. Это простая сетка для работы, которая имеет преимущество в том, что гидростатическое условие представлено точно. Скошенный рельеф дна является проблемой для работы с этой сеткой. В практическом применении, в случаях, когда есть значительные изменения батиметрии, использование системы z -координат может привести к большому числу неактивных ячеек, т.к. сетка должна охватывать весь земной шар, достигая максимальной глубины бассейна. Система z -координат также неприменима для мест, где изопикнические поверхности не являются горизонтальными, и могут появиться ошибки градиента давления. Жёсткая структура сетки также не даёт возможности объединения с представлением свободной поверхности на границе океан-атмосфера. Примеры моделей, использующие z -координаты для вертикальной дискретизации, включают MOM (Modular Ocean Model, <http://www.gfdl.noaa.gov/ocean-model>) и MIT gcm (M.I.T. general circulation model, <http://mitgcm.org/>).

Другой выбор вертикальной координаты – это потенциальная плотность, отнесённая к определенному давлению (близкий аналог энтропии или потенциальной температуры в атмосфере). Изопикническая система координат определяет вертикальные координаты как изоповерхности равной плотности. Это решает проблему искусственных градиентов давления. Эта система координат облегчает получение сетки высокого разрешения с сильными градиентами плотности. Трудность в этом методе состоит в том, что вертикальные слои могут стать очень тонкими или даже исчезнуть в некоторых частях модельного пространства.

Например, у солоноватой воды прибрежных зон обычно всегда более низкая плотность, чем в какой-либо водной массе в открытом океане. Тонкие слои – это также источник вычислительной нестабильности. Другая потенциальная проблема состоит в том, что изопикническая система координат объединяет изопикны как материальные поверхности, таким образом ограничивая поперечно-изопикническое перемешивание. Примеры моделей, использующие изопикнические координаты включают MICOM (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model) и NLOM (Navy Layered Ocean Model, http://www7320.nrlssc.navy.mil/global_nlom/).

И, наконец, третья возможность – s -координата, определяемая формулой:

$$\sigma = (z - \eta) / (H + \eta), \quad (2.1)$$

где h - отклонения уровня водоёма от его невозмущенного положения

при $z = 0$. В результате $s = 0$ на свободной поверхности водоёма при $z = h$ и $s = -1$ на дне при $z = -H$ (рис.2.1).

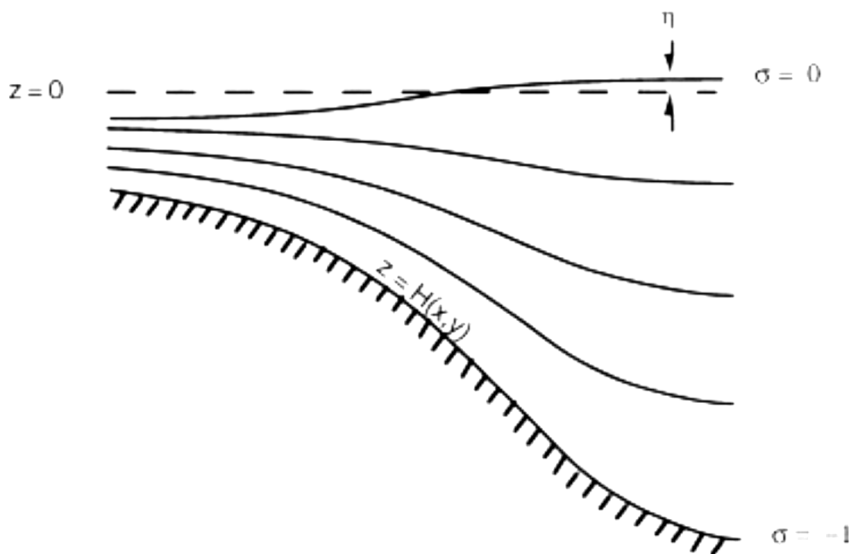


Рисунок 2.1. Схема вертикальной структуры модели с σ -координатой

Отличительной чертой моделей с s -координатой является гладкое представление топографии дна. Это обеспечивает лучшее (по сравнению с уровнями и изопикническими моделями) описание динамики течений в придонном пограничном слое. Достаточно хорошо s -модели описывают также термодинамические эффекты, обусловленные нелинейностью уравнения состояния. Поэтому эти модели хорошо подходят для моделирования течений в шельфовой зоне океанов, мелководных окраинных и внутренних морях и эстуариях рек.

Примером моделей, использующих в качестве вертикальной s -координату является трёхмерная модель общей циркуляции океана Принстонского университета ROM, основанная на полных уравнениях гидротермодинамики океана. ROM обладает дополнительным преимуществом описания вертикального и горизонтального турбулентного переноса на основе испытанных и надежных параметризаций Меллора, Ямады и Смагоринского, соответственно. В частности члены F_x, F_y, F_T, F_s, F_c в правых частях уравнений движения, переноса тепла, соли и примеси, характеризующие изменения соответственно горизонтальных компонент скорости, температуры, солёности и гидродинамически пассивной примеси за счёт

горизонтального турбулентного переноса, параметризуются по аналогии с молекулярными процессами в виде:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}), & F_y &= \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}), \\ F_\phi &= \frac{\partial}{\partial x}(Hq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Hq_y), \end{aligned} \quad (2.2),$$

где

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2 A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = 2 A_M \frac{\partial V}{\partial y}, \\ q_x &= A_H \frac{\partial \phi}{\partial x}, q_y = A_H \frac{\partial \phi}{\partial y}, \end{aligned}$$

U, V – компоненты горизонтальной составляющей скорости течения, $\phi = f(T, S, C)$, T и S – температура и солёность воды, C – концентрация пассивной примеси, A_M и A_H – коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии. Предполагается, что $A_H = A_M$, а коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M определяется формулой Смагоринского:

$$A_M = c_i \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.3)$$

где Δx и Δy – пространственные размеры сетки соответственно в направлении x и y , константа пропорциональности c_i ($\approx 0.10 - 0.20$) является подгоночным параметром и должна выбираться по результатам расчётов так, чтобы обеспечить наилучшее соответствие с данными наблюдений.

Формула (2.3) учитывает анизотропию поля горизонтальной скорости течений, причём коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости A_M и диффузии A_H меняются в пространстве и во времени в зависимости от изменений поля скорости.

Таким образом, основными достоинствами модели РОМ являются: детальное описание придонного пограничного слоя, современные параметризации вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии, учиты-

вающие пространственную неоднородность и в определенной мере анизотропию коэффициента горизонтальной диффузии.

Распространение гидродинамически пассивной, не участвующей в химических и биологических взаимодействиях растворенной примеси, которая распространяется в морской среде под действием течений и турбулентности примеси от точечных источников в случае использования s -координаты описывается уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial CW}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[HA_H \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[HA_H \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \\ + \sum_i Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(\sigma - \sigma_i), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $D = H + \xi$;

z – отклонения уровня от невозмущенного положения;

W – вертикальная составляющая скорости течений (проекция вектора скорости течений на s -координату);

C – концентрация примеси;

K_H – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии;

A_H – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии,

Q_i – скорость поступления примеси в бассейн в i -ом источнике, расположенном в точке (x_i, y_i, σ_i) ;

δ – дельта-функция Дирака.

Граничные условия. Чтобы иметь рабочую численную модель, мы должны определить граничные условия, начальные условия и механизмы воздействий (форсинга). Очевидно, что эти условия будут в некоторой степени зависеть от конкретного применения, поэтому здесь представлено только очень общее описание этих характеристик.

У модели океана, как правило, есть граничные условия на морском дне и на поверхности моря. Кроме того, численная модель покрывает ограниченную вычислительную область, и граничные условия также должны быть определены для боковых границ модели.

При реализации полной системы трёхмерных уравнений гидротермодинамики жидкости в качестве граничных условий на поверхности океана обычно задаются потоки импульса, тепла и соли, а для морского дна – это обычно условия нулевого потока.

Боковые граничные условия определяются конкретным случаем. Если боковая стенка пространства модели может рассматриваться как твёрдая, как в случае границы на суше, мы можем использовать условие нулевого потока $u \times n = 0$, где n – нормальный вектор для боковой стенки, направленный наружу.

Во многих случаях по крайней мере некоторые боковые границы пересекают морские области. В случае глобальных моделей, где боковая граница может быть расположена вдоль линии долготы, периодические граничные условия могут использоваться на восточных и западных границах. Расположение Антарктиды в Южном полюсе позволяет использовать граничное условие нулевого потока, а Северный Ледовитый океан трудно представить с помощью такой модели. Одним из решений данной проблемы может быть моделирование Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики с помощью отдельной модели, использующей вращающуюся сетку с полюсами на экваторе, как сделано в глобальной модели океана OCCAM (Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling Project). Альтернативным методом может служить применение несферической системы координат, где полярная специфика скрыта.

Условие на боковой границе с морем становится более сложным в региональных моделях, которые должны описывать обмен потоками с морскими областями, не покрываемыми численной моделью. Такие условия на открытой границе должны устранять любое отражение от волн и течений, вытекающих из области вычислений, и допускать приток водных масс согласно параметрам, описывающим условия во внешних районах моря. Параметры внешних районов моря могут показывать перенос, вызванный главными морскими течениями и сезонной изменчивостью средней температуры и солёности, или они могут быть извлечены из глобальной модели океана таким же образом, как и данные по атмосферной климатологии. Нет никакого универсально принятого “*правильного*” способа предписать такие открытые граничные условия, и одна и та же модель может использовать комбинацию нескольких методов (нулевой градиент, условия излучения, замедление потока), чтобы достигнуть желаемого результата.

Климатологические ряды данных, включающие в том числе гидрографические данные потенциальной температуры и солёности, важны для инициализации моделей океана. Если в глобальной модели океана задаются начальные условия однородности, то для процессов диффузии потребуются тысячи расчётных лет чтобы воспроизвести реальные водные

массы в глубине моря. Даже если модель будет запущена с использованием гидрографических данных, близких к многолетнему состоянию равновесия, то обычно для модели потребуется некоторое время раскрутки, прежде чем появится реалистичная модель циркуляции. В начале расчётов начальное поле плотности подгоняется к равновесному состоянию. Для модели общей циркуляции установление течений, вызванных баротропным ветром, занимает от нескольких недель до нескольких месяцев, тогда как бароклинный отклик устанавливается после нескольких лет, а термохалинная циркуляция - через примерно десятилетие расчётного времени. Для региональных моделей время раскрутки намного короче, особенно если модельная область находится под влиянием интенсивного водообмена через открытые боковые границы (см. T.Soomere).

Для учёта в моделях циркуляции океана воздействия атмосферы (форсинга) используются результаты прогнозов, получаемые с помощью атмосферных прогностических моделей, такие как температура воздуха, скорость и направление ветра, осадки и др. Обычно атмосферные модели дают краткосрочный прогноз на 48 часов, что определяет сроки прогноза моделей циркуляции океана.

Для замерзающих морей к гидродинамическому модулю обычно добавляется модель льда. Задачей математического моделирования ледяного покрова является воспроизведение основных физических процессов, происходящих на стадиях образования, нарастания, перераспределения, таяния и исчезновения льда в море. При этом сложное строение морского ледяного покрова, разнообразие форм, толщины, торосистости, неравномерности ветра и течений создают довольно сложную картину дрейфа льда.

В настоящее время не существует универсальных моделей льда, которые могли бы использоваться для любого из замерзающих морей. В связи с этим, для каждого конкретного моря необходимо осуществить параметризацию многих характеристик природной среды, влияющих на ледовые процессы.

Для использования модели морского льда в оперативной практике необходимо, чтобы модель описывала динамику и термодинамику снежно-ледяного покрова и позволяла рассчитывать изменения скорости дрейфа льда, его толщины и площади.

Так, для описания эволюции ледового покрова в Балтийском море успешно используется модель с несколькими категориями состояний льда, разработанная финскими исследователями. В модели лёд делится на 2

основные категории: недеформированный и деформированный лёд. В свою очередь, недеформированный лёд делится на несколько категорий, а деформированный лёд - на торосистый и наслоённый лёд. Наслоённый лёд существует при толщинах льда, меньших 17 см (так называемая толщина переброски); при больших толщинах лёд относится к категории торосистого льда. Эволюция каждой категории льда описывается уравнениями для концентрации (площади) и массы льда, причём эти уравнения решаются в лагранжевом пространстве толщин льда. В каждой категории толщина льда изменяется в результате адвекции, деформации и термодинамических процессов. Предполагается, что припайный лёд существует в областях, где глубина водоёма меньше заданного критического значения. Также в модели учитывается состояние снежного покрова.

2.1.2. Модели ветрового волнения

Прогнозирование волнения – это процесс оценки того, как будут изменяться параметры волнения под действием ветра на водную поверхность [Абузьяров, 2009]. Зависимость полей волнения от полей ветра определяет тесную связь между волновыми и метеорологическими моделями. Поэтому вслед за развитием атмосферных моделей развиваются и волновые модели. С улучшением качества атмосферных моделей улучшалось качество волновых моделей и, как следствие, точность выпускаемых прогнозов. Кроме того, по мере углубления понимания физических процессов, происходящих в океане и атмосфере, которые определяют механизмы взаимодействия волн с приводным слоем атмосферы, становится всё более ясным, что эти взаимодействия являются более сложными и глубокими, чем представлялось до сих пор.

В волновых моделях глубокого моря развитие волн в основном контролируется ветром. Исходная информация о ветре при расчётах параметров волн представляется в виде последовательности диагностических и прогностических полей векторов ветра. В мелководных районах моря, где отношение высоты волны к её длине меньше 0.5, на развитие волн оказывают влияние топография дна, рельеф береговой линии и др.

В мировой практике для воспроизведения ветрового волнения применяется несколько десятков различных моделей. Их можно разделить на четыре группы: 1) спектральные дискретные; 2) спектральные параметрические; 3) интегральные параметрические; 4) прочие (эмпирические, энергетические, монохроматические и различные их комбинации). Дис-

кретные модели условно подразделяются на поколения. Различие в поколениях заключается в степени подробности описания механизма нелинейного взаимодействия в спектре ветровых волн. В первых трёх поколениях используются теоретически нестрогие процедуры упрощения интеграла взаимодействия, например, в широко известной модели WAM. В настоящее время в мире существует лишь две модели четвёртого поколения с точным математическим описанием механизма нелинейного взаимодействия – EXACT-NL и российская атмосферно-волновая модель «узконаправленного» приближения волнового спектра (PABM).

Наиболее известными волновыми моделями являются дискретная модель WAM с её модификациями, применяемая в Европейском центре среднесрочных прогнозов (ЕЦСПП) и модель WAVE WATCH (WW3), по которой даются прогнозы волнения Службой погоды США.

Большинство применяемых в настоящее время волновых моделей для глубокого моря основаны на численном решении уравнения радиационного баланса для двумерного волнового спектра. Уравнение переноса описывает распространение различных компонент волн в спектре с различными частотами и направлениями распространения с соответствующими групповыми скоростями. Изменение энергии этих компонент происходит под действием ветра, диссипации и нелинейных взаимодействий высокого порядка. С помощью волновых моделей рассчитывается полный двумерный спектр волн на каждом временном шаге и в каждом узле сеточной области. Уравнение переноса энергии имеет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla(C_g E) = S, \quad (2.4)$$

где $E = E(f, \theta, x, t)$ – двумерный спектр волнения (спектр колебаний поверхности), зависящий от частоты f и направления волн θ ;

$C_g = C_g(f, \theta)$ – групповая скорость на глубокой воде;

S – функция источника, включающая в себя различные процессы, такие как S_{in} – поступление энергии за счёт ветра, S_{nl} – нелинейная передача энергии в результате взаимодействия волн, S_{ds} – диссипация энергии за счёт обрушения гребней волн и внутреннего турбулентного трения.

Наиболее важным с точки зрения моделирования является определение функции $S = (S_{in} + S_{nl} + S_{ds})$. Если эта функция определена точно, то уравнение может быть проинтегрировано при определенных начальных и

граничных условиях, что даёт возможность рассчитывать спектральные характеристики волн с точностью, зависящей в основном от точности исходных полей ветра. При равенстве этой функции нулю уравнение (2.4) описывает распространение мертвой зыби на глубокой воде. В общем случае данное уравнение не имеет аналитического решения и реализуется численными методами.

Оценки различных компонент в правой части уравнения (2.4) показывают их различные пространственно-временные масштабы, в которых проявляются те или другие эволюционные механизмы, определяющие поведение поля ветрового волнения. Изучение механизмов, формирующих спектр, в настоящее время является одной из центральных проблем моделирования ветрового волнения.

2.1.3. Прогностические модели волн

Как уже упоминалось в разделе 2.1.2, одной из наиболее широко применяемых в оперативной практике прогноза ветрового волнения является модель WAM. Модель была разработана международной рабочей группой по математическому моделированию ветрового волнения WAMDI (Wave Modeling Group) и была подготовлена к практическому использованию. Модель WAM относится к моделям третьего поколения и основывается на численном интегрировании уравнения (2.4). Спектр аппроксимируется 26 частотами и 12 направлениями с 30-ти градусным разрешением. Шаг интегрирования по времени составляет 15 минут для региональной версии модели и 1 час – для глобальной.

Математическая задача решается в сферических переменных, что даёт возможность использовать модель как глобальную. Модель классифицируется как модель 3-его поколения. В настоящее время модель WAM является, пожалуй, единственной волновой моделью, в которой уравнение баланса спектральной энергии реализовано в наиболее полной форме. Данная модель используется как оперативная в ЕЦСПП. Работают две версии модели: первая – глобальная, позволяет составлять прогнозы волнения до 10 суток на сферической сетке с шагом 3^0 ; вторая версия адаптирована к условиям Средиземного моря. По ней считают на сетке с разрешением 0.5^0 на срок до 5 суток. Модель позволяет вести расчёты волн и на мелководье. В модели учитываются рефракция, донное трение, а функция слабонелинейного переноса энергии учитывает соответствующую

поправку, связанную с изменением слабонелинейного взаимодействия волн в бассейне конечной глубины.

Модель WAVEWATCH. Модель WAVEWATCH была разработана в США. Она, по сути, является развитием модели WAM в отношении параметризации функции источника S , хотя аппроксимация слабонелинейного взаимодействия используется та же, что и в модели WAM. В модели WAVEWATCH применена более совершенная численная схема решения уравнения баланса волновой энергии, чем в модели WAM.

Модель SWAN. Модель SWAN (Simulating WAVes Nearshore) разработана в Дельфтском Техническом Университете (Нидерланды) и ориентирована на расчёт волнения в ограниченных акваториях, заливах, озерах и эстуариях. Модель основана на уравнении баланса волнового действия. Рассчитывается генерация волн ветром, рефракция волн за счёт течений и перепада глубин, диссипация за счёт обрушения волн («барашки»), влияние придонного трения. Исходной информацией служат поля ветра и течений. Результаты расчёта представляются полем высот волн. Дополнительно выдаются поля длин и периодов волн и направления волнения.

Уравнение волнового баланса имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \Theta} c_\Theta N = \frac{S}{\sigma}, \quad (2.5)$$

где N – спектр плотности действия.

В левой части уравнения первый член описывает локальную скорость изменения плотности действия, второй и третий – распространение действия (со скоростью распространения c_x и c_y в x и y пространстве соответственно), четвёртый – изменение относительной частоты вследствие изменения поля глубин и поля течений (со скоростью распространения c_σ в σ -пространстве), пятый – рефракция волн, индуцируемая вариациями полей глубин и течений (со скоростью распространения c_Θ в Θ -пространстве). Правая часть уравнения - источник в терминах плотности энергии, отражающий эффекты генерации, диссипации и нелинейного взаимодействия волн.

Модель SWAN рассчитывает распространение волны через линейную структуру, такую как волнорез (дамба). Такое препятствие повлияет на поле волны двумя способами: сначала уменьшит высоту волны в местном масштабе по всей её длине, а потом вызовет дифракцию на конце(ах)

волны. Модель не в состоянии оценить дифракцию. Однако, для нерегулярных полей волн с коротким гребнем влияние дифракции оказывается невелико, кроме области, находящейся на расстоянии меньше одной или двух длин волны от конца препятствия. Таким образом, модель может обоснованно рассчитывать волны вокруг препятствия, в случае, если направленный спектр поступающих волн не слишком узок. Препятствия в поперечнике обычно слишком узкие для нижнего предела разрешения сетки модели SWAN, поэтому препятствие моделируется как линия. SWAN может работать в режиме первого-, второго- и третьего поколения.

2.1.4. Модели распространения нефтяных загрязнений

Наряду с гидродинамическим состоянием морской среды оперативные прогностические системы включают в себя модели распространения и трансформации нефтяных загрязнений как наиболее распространенного вида загрязнений морской среды.

К настоящему времени разработано и используется достаточно большое количество моделей для расчёта и прогноза аварийных разливов нефти. Применяемые в практике модели, в зависимости от решаемых задач, варьируются от простого моделирования траектории перемещения пятна загрязнения (*drift* или *trajectory models*) до сложных трёхмерных моделей переноса и трансформации нефтезагрязнений.

Большинство существующих моделей рассчитывают процессы растекания, адвекции и диффузии нефти и стандартный набор процессов трансформации, который обычно включает в себя испарение, дисперсию нефти в воду ветровыми волнами, эмульгирование. При этом используются одинаковые или схожие (с небольшими вариациями) полуэмпирические зависимости, полученные на основе результатов лабораторных и натурных экспериментов еще в 80-ые годы [Reed et al., 1999]. Как правило, модели не учитывают процессы растворения, фотоокисления, химического и биологического разложения нефтеуглеводородов. Трёхмерные модели дополнительно рассчитывают распространение нефтеуглеводородов в толще воды и осаждение на дно.

Рассмотрим модели, которые в настоящее время наиболее широко применяются в практике и, в принципе, в той или иной степени удовлетворяют сформулированным требованиям. При этом необходимо отметить, что все нефтяные модели распространяются исключительно на коммерческой или договорной основе.

В оперативную океанологическую систему (ООС) Балтийского моря включена специально разработанная в шведском институте метеорологии и гидрологии (SMHI) модель расчёта нефтяных загрязнений SEATRACK. Модель рассчитывает в оперативном режиме перенос и трансформацию нефтяных загрязнений, даёт прогностические параметры загрязнения и рассчитывает «обратный» перенос загрязнения на срок до 10 суток. В совокупности с использованием информационной системы перемещения судов, такие расчёты позволяют идентифицировать судно-загрязнитель для наложения штрафных санкций. В сущности, модель является хорошо развитой дрейфовой моделью. Трёхмерность модели сводится к расчётам распространения трассеров с нейтральной плавучестью. Влияние ледяного покрова учитывается путём ограничения области распространения загрязнения. Подводные источники не рассматриваются.

Для оперативных расчётов переноса и трансформации нефтяных загрязнений в Северном, Норвежском и западной части Баренцева морей используется модель OSCAR, разработанная в норвежском институте SINTEF. Модель используется совместно со специально разработанной моделью трансформации нефти OWM (Oil Weathering Model), которая основана на результатах многочисленных экспериментальных исследований различных видов нефти и нефтепродуктов. В модели рассчитывается распространение дисперсионного шлейфа в верхнем слое воды. Влияние ледяного покрова учитывается путём ограничения области распространения загрязнения при растекании и испарении. Кроме того, учитывается влияние сплошного льда на перенос нефти. А также в модели рассматривается загрязнение от подводных источников.

Следует отметить комплекс программных продуктов, разработанный в США в Applied Science Associates (ASA). Модели получили широкое распространение и используются для расчётов на акваториях восточного побережья США, Австралии, Бразилии и др. Модельный комплекс включает в себя модель переноса и трансформации нефтяных загрязнений OILMAP, трёхмерную модель распространения нефтяных загрязнений SIMAP, модель распространения нефтяных загрязнений от подводных источников OILMAPDEEP и ещё десяток моделей экологического направления (www.asascience.com). Все модели ASA используют разработанный на базе ESRI GIS технологии интерфейс. Модели могут использоваться в оперативном режиме. Влияние ледяного покрова не рассматривается.

В прибрежных водах Португалии и Испании для расчёта переноса и трансформации нефтяных загрязнений используется модельный комплекс

MONID, разработанный группой MARETEC в португальском Техническом Университете и включающий в себя трёхмерную гидродинамическую модель и модуль переноса и трансформации нефтяных загрязнений. Нефтяной модуль учитывает все основные процессы трансформации нефти, включая процессы увеличения плотности и вязкости. После объединения с испанской моделью погоды была образована оперативная система МЕТЕОМОНID. В модели рассчитывается распространение дисперсионного шлейфа в верхнем слое воды. Влияние ледяного покрова и загрязнение от подводных источников в модели не рассматриваются.

Для расчёта переноса и трансформации нефтяных загрязнений на акваториях Черного и Азовского морей в ИПММС НАН Украины была разработана модель OILTOX. Модель имеет хорошую теоретическую основу, может применяться в оперативном режиме. Особое внимание в модели уделяется процессу вертикальной дисперсии нефтяного slicka ветровыми волнами. Модель является трёхмерной, но рассматривается только распространение дисперсионного шлейфа и адсорбция капель нефти на взвешенных органических частицах. Влияние ледяного покрова и загрязнение от подводных источников в модели не рассматриваются.

В отечественной практике разработка оперативных нефтяных моделей не имеет такого развития, как за рубежом. Предпочтение отдается известным зарубежным разработкам. Так, Северо-Западное УГМС получило доступ к модели SEATRACK, Мурманское управление использует OSCAR+OWM. Исключением является оперативная система VOS-RT, действующая на акватории шельфа о. Сахалин и базирующаяся на модели ДВНИГМИ и модели SPILLMOD, разработанной в ГОИНе [Овсиенко и др., 2005]. Модель рассматривает перенос и трансформацию нефтяных загрязнений только на поверхности моря, загрязнение от подводных источников в модели не рассматривается. Модель имеет модификацию, учитывающую низкие температуры и наличие льда на акватории. При этом дополнительно для расчётов требуется задание характеристик ледового покрова – сплоченность, толщина, характерный размер льдин, их расположение (расстояние между льдинами), направление и скорость дрейфа льда.

К сожалению, в настоящее время ледовые модели не способны рассчитывать характерный размер льдин и их расположение. Поэтому такой подход, будучи с одной стороны физически обоснован, с другой стороны, остается пока мало пригодным при оперативных расчётах аварийных разливов нефти в ледовитых морях.

Таким образом, анализ различных моделей распространения нефтяных загрязнений позволил установить, что при всём разнообразии и хорошем уровне развития моделирования нефтяных загрязнений за рубежом, отмечается крайне слабое развитие моделирования при наличии ледяного покрова. Очевидно, главной причиной этого является неактуальность учёта ледяного покрова при расчётах в большинстве районов добычи и транспортировки нефти.

В обзорной статье по состоянию и перспективам моделирования нефтяных разливов [Reed et al., 1999] отмечается недостаточное развитие моделей и методов расчёта процессов распространения нефти в покрытых льдом морях и процессов взаимодействия между нефтью и льдом. Предпочтение до сих пор отдается методам, позволяющим сделать хотя бы грубую оценку исследуемых процессов. Тем не менее, за последние 30 - 35 лет проведено множество лабораторных и экспериментальных исследований, и процессы взаимодействия нефти со льдом достаточно хорошо изучены.

В соответствии с наблюдениями и результатами ретроспективного моделирования [Reed et al., 1999;], скорость переноса нефти существенно уменьшается в зависимости от ледовых условий, и направление переноса нефтяного пятна отклоняется на угол до 60^0 от предвычисленного направления переноса без учёта ледяного покрова. Поэтому при расчётах скорости и направления переноса спиллетов был введен параметр, зависящий от сплоченности льда в ближайших узлах сетки. Детальное описание процесса расчёта приведено в работах российских ученых, например, Станового В.В. [Становой и др., 2007].

Разработанная в ААНИИ модель переноса и трансформации нефтяных загрязнений в арктических ледовитых морях OilMARS (Oil Spill Model for the Arctic Seas) [Становой и др., 2012] учитывает перенос и трансформацию нефтяных загрязнений на поверхности моря в результате аварийных длительных/моментальных разливов нефти от неподвижных или движущихся источников, а также распространение обнаруженных на поверхности моря пятен нефтяных загрязнений. В настоящее время модель работает в трёхмерном варианте, рассчитывая внутриводное распространение дисперсионного шлейфа и нефти, погружившейся в воду. Модель способна рассчитывать появление и распространение вторичного нефтяного загрязнения на поверхности воды и загрязнение морского дна. Кроме того, модель учитывает влияние сплоченности и дрейфа ледяного покрова на распространение загрязнения, а также попадание нефти на верхнюю по-

верхность ледяного покрова и под лед в результате сжатия дрейфующего льда. Модель была усовершенствована для работы в оперативном режиме и включения в ООС арктических морей. В настоящее время проводится опытная эксплуатация оперативной модели распространения нефтяных загрязнений в арктических морях и разрабатывается блок расчёта загрязнения от подводных источников (аварии на газо- и нефтепроводах).

Используемый в модели подход даёт возможность промоделировать поведение нефти при сжатиях льда. При увеличении сплоченности льда до 10 баллов считается, что вероятность попадания нефти на верхнюю поверхность льда или под лед одинакова. Поэтому вводится случайный коэффициент от 0 до 1, определяющий какая часть массы спиллета оказывается на льду. При этом считается, что оставшаяся часть нефти оказывается подо льдом.

Нефть, попавшая на верхнюю поверхность ледяного покрова, растекается по поверхности, продолжает испаряться, частично впитывается в ледяной покров и переносится дрейфующей загрязненной льдиной. Для расчётов процесса растекания нефти на верхней поверхности ледяного покрова и для расчёта глубины проникновения нефти в ледяной покров использовались полуэмпирические параметризации, полученные в результате лабораторных и экспериментальных исследований. Также в модели рассматривается случай мгновенного сброса нефтепродукта на верхнюю поверхность льда.

Для расчёта процесса растекания нефти подо льдом используется полуэмпирическое выражение, полученное для горизонтальной и относительно гладкой нижней поверхности льда, т.е. принимается, что горизонтальные размеры пятна нефти меньше расстояний между неровностями льда, ограничивающими растекание нефти. Как показали экспериментальные исследования, перемещение нефти относительно нижней поверхности льда начинается при достижении некоторой критической скорости течения воды относительно льда. При скорости течения меньше критической нефть перемещается вместе со льдом. Величина критической скорости является функцией плотности нефти, поверхностного натяжения нефть - вода, шероховатости льда и толщины нефтяного пятна. Также в модели учитывается возможность загрязнения нижней поверхности льда при подъёме нефти и выходе вторичного загрязнения в зоне дрейфующего льда.

Учёт влияния сплоченности льда на процессы растекания нефти на поверхности воды, испарения, вертикальной дисперсии и горизонтальной диффузии в модели OilMARS заключается в ограничении площади пятна

и соответствующего увеличению толщины, т.е., в принципе, не отличается от подхода, применяемого в OSCAR+OWM.

2.2. Усвоение данных наблюдений в численных моделях

Успешность океанографического прогноза для небольших ограниченных районов моря определяется как совершенством используемой гидродинамической модели, так и качеством прогноза атмосферных характеристик, начальных условий и граничных условий на жидкой части границы. Последний фактор – задание прогностических условий на жидкой части границы – ключевая проблема океанографического прогноза, успешное решение которой в значительной мере определяет качество конечного результата. Действительно, собственно гидродинамическая модель может совершенствоваться, обеспечивая повышение качества расчёта гидродинамических полей. Граничные условия на поверхности моря задаются на основе той или иной оперативной атмосферной модели, прогнозы по которой используют поступающую в реальном времени информацию об атмосферных характеристиках. Начальные условия в исследуемом бассейне, которые берутся, как правило, из результатов предыдущего прогноза, могут быть «подправлены» данными наблюдений, с использованием современных методов ассимиляции. Качество же условий на жидкой границе полностью определяется другой (внешней) оперативной океанографической моделью, которая, в отличие от атмосферных моделей, использует ограниченное число данных наблюдений, и ухудшается в результате неизбежной интерполяции с сетки внешней модели на сетку, используемую основной прогностической моделью. Таким образом, единственный для разработчика путь совершенствования океанографического прогноза исследуемого района моря – ассимиляция в оперативном режиме как можно большего объёма данных наблюдений, включая спутниковую информацию.

Ассимиляция данных наблюдений в численную модель является сложной и самостоятельной задачей оперативной океанографии. В настоящее время существуют различные подходы и методы ассимиляции данных наблюдений, рассмотрению которых и будет посвящена следующая глава учебного пособия.

ГЛАВА 3. АССИМИЛЯЦИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОГРАФИИ

3.1. Концепция проблемы ассимиляции (усвоения) данных наблюдений

Основные результаты деятельности оперативной океанографической системы могут быть определены как информация о текущем состоянии океана, о будущем состоянии (прогноз) и прошлом (ретроспективные прогнозы или ре-анализ).

Основной источник информации об океане – это данные наблюдений. На сегодняшний день существует множество различных технологий производства измерений. Это могут быть наблюдения в фиксированной точке (заякоренные буйковые станции), профили характеристик морской среды (CTD) или пространственные распределения (данные спутникового зондирования) и т.д. При этом все данные наблюдений о какой-либо характеристике морской среды всегда фрагментарны, т.е. привязаны к определённом пространственному и временному положению, а также имеют определённые ограничения. Так, например, дрейтеры Argo передают данные измерений один раз в 10 суток, спутниковая поверхностная температура с высоким пространственным разрешением ~ 1 км может быть доступна более 1 раза в сутки, но основное её ограничение – облачность. Более того, наблюдения дают нам информацию только о некоторых параметрах динамической системы, а не обо всей в целом, таким образом, данные наблюдений не могут дать представления о 4-х мерном состоянии динамической системы.

Другой способ исследования динамической системы – математическое моделирование. Но нельзя забывать, что любая модель является лишь неким приближённым описанием реального объекта. Уравнения модели, описывающие состояние системы, отнюдь не безупречны в силу ограниченности наших знаний о законах, управляющих поведением динамической системы.

В то же время они записываются в дискретном виде, даже региональные гидродинамические модели имеют пространственное разрешение по горизонтали в основном не превышающее 1 милю и 1 м по вертикали, следовательно, целый ряд процессов остаются подсеточными и описываются параметрически. Наиболее наглядный пример, определение коэффициентов турбулентного перемешивания. Все современные схемы турбу-

лентного замыкания содержат какие-либо параметризации с множеством неопределённых числовых констант.

Это одна сторона проблемы математического моделирования, но есть и другая, не менее актуальная. Любая численная модель очень чувствительна к начальным условиям, которые задаются исходя из данных наблюдений. А они, в свою очередь, как уже упоминалось выше, всегда фрагментарны и не могут отражать реального состояния объекта. Это ещё усугубляется тем, что вследствие нелинейного взаимодействия движений различных пространственных и временных масштабов, состояние динамической системы является неустойчивым в том смысле, что два близких в начальный момент времени состояния не останутся таковыми навсегда. Это приводит к увеличению расхождений между модельным и реальным состоянием динамической системы.

Решение проблемы – это совместное использование данных наблюдений и математического моделирования, а именно коррекция расчётов математической модели с помощью данных измерений представляет собой задачу ассимиляции (усвоения) данных наблюдений. Основной целью ассимиляции данных наблюдений является улучшение нашего понимания состояния океана, мониторинг и прогнозирование в различных временных и пространственных масштабах.

Процедура «ассимиляции» является существенным компонентом оперативного прогнозирования, она привлекается для улучшения прогностических качеств численной модели, путём постоянно возобновляемых прогнозов, основанных на разнице между предыдущими прогнозами и недавно полученными данными. Общий вид ассимиляционной схемы, встроенной в термогидродинамическую модель океана, представлен на рис. 3.1.

Современные методики ассимиляции данных также используются для ре-анализа динамической системы [Daley R., 1991]. Поля ре-анализа являются отдельным продуктом. Во-первых, эти продукты представляют собой воссоздание трёхмерного состояния объекта наиболее приближённого к реальному, во-вторых, используются в качестве начальных условий численного моделирования, и наконец, могут быть использованы при отладке самих моделей.

Ассимиляция данных используется не только для ретроспективных, краткосрочных и долгосрочных прогнозов. Она может обеспечить механизм контроля качества систем оперативного наблюдения. В некоторых случаях модели ассимиляции могут определить в оперативном режиме сомнительные наблюдения и, возможно, отклонить их, основываясь на



Рисунок 3.1. Общий алгоритм ассимиляционного процесса

сравнении с соответствующими прогнозами модели и принимая во внимание статистическое распределение ошибок. Последовательность неверных наблюдений может помочь определить неисправный прибор, который необходимо своевременно починить.

Объединение моделей процессов и наблюдений по существу повышает информативность данных наблюдений. Действительно, сами по себе данные измерений имеют совершенно конкретную область значимости, так как характеризуют функции состояния в том месте и в то время, когда и где производятся наблюдения, т.е. данные наблюдений всегда фрагментарны. Если же они используются совместно с моделями процессов, информативность наблюдений значительно возрастает, поскольку с помощью моделей становятся «видимыми» масштабы пространственно-временных областей «влияния» данных наблюдений.

На сегодняшний день оперативную систему невозможно представить без процедуры ассимиляции данных. Связано это, в первую очередь, с развитием компьютерных сетей и суперкомпьютеров, появлением больших массивов наблюдаемой информации, доступных в режиме близком к ре-

альному времени: данные спутниковых наблюдений и автоматических буёв, а также с наличием скоростных средств связи. Всё это требует развития соответствующего математического аппарата, разработки надёжных алгоритмов реализации.

Основные трудности реализации процедуры ассимиляции заключаются в следующем:

- ассимиляция данных – это обратная задача, т.е. конечное число наблюдений используется для описания непрерывного поля-функции, которое содержит бесконечное количество точек;

- обратные задачи являются некорректно поставленными задачами. *Корректно поставленной задачей* считается тогда, когда удовлетворяет трём условиям: существование решения, единственность решения и решение непрерывно зависит от данных в некоторой разумной *топологии*. Третье условие мы всегда нарушаем, т.к. используем дискретизацию как по времени, так и по пространству. Также в случае ассимиляции полученное поле, решение обратной задачи, полностью не доопределено. Существует множество полей, которые точно удовлетворяют наблюдениям и модели; таким образом, решение не является единственным;

- динамика океана нелинейна, тогда как большинство методов для расчёта решения обратной задачи основано на линейной аппроксимации;

- модель и данные являются неполными и содержат неопределённость;

- многие данные, доступные для ассимиляции в математическую модель, являются данными с поверхностного слоя, например, данные о поверхностной температуре или альтиметрии.

Перечень различных методов ассимиляции данных наблюдений можно найти, например, в [Daley R., 1991, Wunsch C, 1996], применительно к океанологии рассматриваются различные схемы усвоения. Перечислим основные методы ассимиляции, получившие распространение в океанологии, по степени сложности их реализации:

- анализ Крессмана (Cressman analysis), метод последовательных коррекций (successive correction method SCM), релаксационные схемы, метод привлечения (nudging);

- фильтр Калмана, метод оптимальной интерполяции (Optimal interpolation)

- трёхмерный вариационный метод (Three-dimensional variational analysis 3D-var)

- четырёхмерный вариационный метод (Four-dimensional variational analysis 4D-var), расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman filter).

3.2. Простые ассимиляционные схемы

Перед тем как рассмотреть принципы работы различных ассимиляционных схем, введём основные понятия и термины, используемые при математической постановке задачи усвоения данных наблюдений.

Вектор состояния x . Вектор, содержащий информацию о состоянии динамической системы, в нашем случае может выглядеть следующим образом:

$$x = \begin{bmatrix} \zeta \\ T \\ S \end{bmatrix},$$

он может также содержать информацию о скоростях течений или любых других параметрах состояния океана.

Анализ x_a . Результатом процедуры ассимиляции является анализ состояния динамической системы, которое наиболее приближенно к реальному состоянию, исходя из имеющихся данных наблюдений, и в котором выполняются все физические законы рассматриваемой динамической системы. На практике анализ представляет собой поля различных характеристик морской среды (температура, солёность, уровень, скорости течений и т.д.).

Предварительный прогноз или фоновое состояние (background) x_b . Предсказанное состояние динамической системы до привлечения процедуры ассимиляции. В качестве фонового состояния может выступать как модельное решение, так и климатические значения.

Истинное состояние x_t . Истинное состояние динамической системы на практике всегда неизвестно.

Вектор наблюдений y . Вектор, содержащий информацию о данных наблюдений.

Вектор приращений dx . Вектор, определяемый как разность между искомым вектором состояния (анализом) x_a и фоновым вектором состояния x_b .

Перейдем к рассмотрению простой ассимиляционной процедуры. Представим процедуру ассимиляции как алгоритм, в котором анализ равен наблюдаемой величине в окрестности данного наблюдения и некоторому условному состоянию (это может быть как климат, так и предварительный

прогноз). Такой подход лежит в основе анализа Крессмана [3].

Рассмотрим некоторое одномерное дискретное поле какого-либо параметра $x_b(i)$ в точках модельного пространства i , определяемое климатом или предварительным прогнозом, $y(j)$ – наблюдаемые значения этого же параметра в точках наблюдений $j = 1, \dots, m$. Модельное состояние x_a в каждой точке модельного поля i , получаемое в результате анализа Крессмана, можно описать следующим уравнением:

$$x_a(i) = x_b(i) + \frac{\sum_{j=1}^m w(i, j) \{y(j) - x_b(i)\}}{\sum_{j=1}^m w(i, j)}, \quad (3.1)$$

$$w(i, j) = \max \left(0, \frac{r^2 - d_{i,j}^2}{r^2 + d_{i,j}^2} \right), \quad (3.2)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между расчётными узлами модельного поля i и точками наблюдений j , $w(i, j)$ – весовая функция, равная 1, если точки i и j совпадают, в этом случае фоновое значение заменяется наблюдаемым, $r = const$ – радиус влияния, если $d_{i,j}$ превышает r , весовая функция этого наблюдения равна 0.

На рис. 3.2 можно видеть пример действия анализа Крессмана. Анализ представляет собой интерполяцию между фоновым состоянием и наблюдениями в окрестности каждого наблюдения, чем ближе к точке наблюдений, тем больше значение весовой функции.

Существует множество вариантов метода Крессмана, суть при этом не меняется, только переопределяется вид весовой функции, например, возможен другой вариант:

$$w(i, j) = \exp(-d_{i,j}^2 / 2r^2).$$

В эту группу также можно отнести метод последовательных коррекций (successive correction method SCM) или метод привлечения (nudging). Их отличие от метода Крессмана заключается лишь в том, что весовая функция в точке наблюдений может быть не равна 1. На практике можно применить эти методы не за один шаг по времени, а использовать ре-

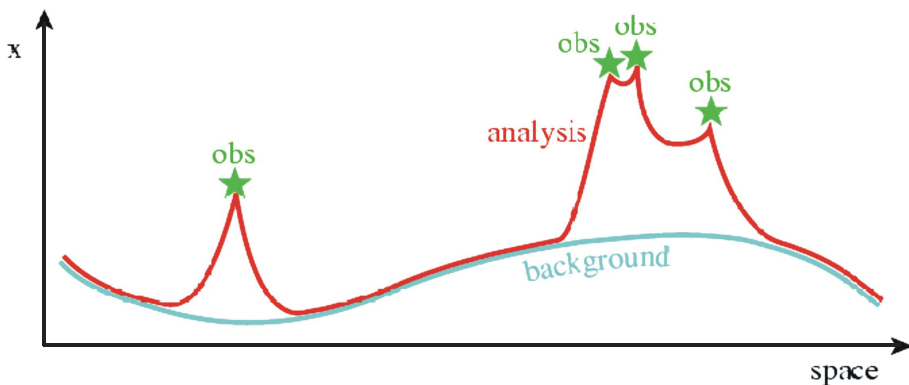


Рисунок 3.2. Анализ Крессмана [7]

лаксационную схему, т.е. производить коррекцию модельного поля за несколько итераций, что сделает поля анализа более гладким.

Естественно, при определенной подгонке можно достичь хороших результатов, но нет никаких обоснованных предположений по выбору оптимального вида весовой функции. С практической точки зрения анализ Крессмана нельзя считать удовлетворительным исходя из следующих положений:

- если предварительная оценка модельного состояния достаточно хорошего качества, нет необходимости заменять его данными наблюдений более плохого качества;

- удаляясь от точки наблюдений, не ясно, как поле анализа должно стремиться к фоновому состоянию, проще говоря, возникает вопрос, как определить вид весовой функции;

- анализ должен соответствовать основным физическим законам рассматриваемой системы, таким как гладкость (неразрывность) решения, взаимосвязь с другими переменными (гидростатический и геострофический балансы, поведение на границе). Анализ Крессмана не может этого гарантировать, могут возникнуть не физические явления в решении.

В силу выше сказанного, анализ Крессмана может быть использован только как первичный инструмент.

3.3. Вероятностный подход к проблеме ассимиляции данных наблюдений

Итак, что же необходимо для получения анализа удовлетворительного качества:

– самое первое, это хорошее качество предварительного прогноза, т.е. если наша модель в принципе плохая и не описывает основных черт поведения системы, то никакая ассимиляция это не исправит;

– если имеется достаточно плотное поле данных, то можно предположить, что поле анализа лежит где-то посередине между состоянием и данными наблюдений. При этом анализ должен быть ближе к данным, которым мы больше доверяем, а у «подозрительных» данных наблюдений (менее репрезентативных) должны быть меньшие веса;

– анализ должен быть гладким, т.к. таковы физические поля. Поэтому при удалении от точек наблюдений анализ должен стремиться к фоновому состоянию плавно, и изменения должны укладываться в типичный масштаб изменений этих величин;

– анализ должен удовлетворять физическим законам, но в тоже время хороший анализ должен воспроизводить аномалии, т.к. это наиболее важно в прогнозе (экстремальное поведение, катастрофические явления).

В итоге ассимиляция данных должна включать информацию о данных наблюдений, фоновом состоянии и знание физических законов исследуемой динамической системы. При этом важно, что любые данные служат дополнительным источником информации, но в тоже время их нельзя принимать за истинные, необходим компромисс, есть ошибки и в модели и в данных наблюдений, и никогда нет точной уверенности, что верно. Следовательно, необходимо найти метод, который обеспечит минимизацию в среднем разницы между анализом и истинным состоянием динамической системы.

Для создания автоматического алгоритма необходимо представить математически неопределенность данных (как наблюдений так и предварительного прогноза). Это возможно с привлечением вероятностного подхода. Алгоритм ассимиляции должен быть основан на формальных требованиях, субъективный подход должен быть сведен к минимуму. В этом случае процедура ассимиляции может быть определена как проблема оптимизации.

При вероятностном подходе к задаче ассимиляции данных наблюдений представим существующую неопределенность предварительного прогноза, анализа и данных наблюдений с помощью ошибок между ними и истинным состоянием.

– ошибки предварительного прогноза ε_b , где $\varepsilon_b = x_b - x_t$ разность между вектором фонового состояния (предварительного прогноза) и вектором истинного состояния. Здесь ошибки, связанные с дискретизацией, не учи-

тываются. Ковариационная матрица ошибок:

$$B = \overline{(\varepsilon_b - \overline{\varepsilon_b})} (\varepsilon_b - \overline{\varepsilon_b})^T,$$

где верхний индекс Т обозначает транспонирование матрицы;

– ошибки данных наблюдений ε_0 , где $\varepsilon_0 = y - H(x_t)$ разность между вектором наблюдений и вектором истинного состояния, $H(x)$ – оператор наблюдений, который обеспечивает переход от модельного пространства к пространству данных наблюдений. На практике H представляет собой оператор интерполяции из модельной сетки в точки данных наблюдений. Ковариационная матрица ошибок наблюдений:

$$R = \overline{(\varepsilon_o - \overline{\varepsilon_o})} (\varepsilon_o - \overline{\varepsilon_o})^T.$$

R – включает инструментальные погрешности, погрешности метода измерений и ошибки дискретизации.

– ошибки анализа ε_a , $\varepsilon_a = x_a - x_t$ разность между анализом и истинным состоянием системы. Ковариационная матрица ошибок анализа:

$$A = \overline{(\varepsilon_a - \overline{\varepsilon_a})} (\varepsilon_a - \overline{\varepsilon_a})^T.$$

Собственно задача ассимиляции сводится к минимизированию ошибок анализа.

Отличие средних значений ошибок от нуля указывает на существование систематических ошибок в модели, данных наблюдений и используемой ассимиляционной процедуре.

3.4. Стохастические и вариационные подходы в ассимиляции данных наблюдений

Рассмотрим линейный метод анализа, основанный на методе наименьших квадратов [5]. Пусть мы имеем вектор предварительного прогноза x_b размерностью n и вектор данных наблюдений y размерностью m , тогда размерность ковариационной матрицы ошибок предварительного

прогноза B будет равна $n \times n$, $R - m \times m$ и $A - n \times n$. Сделаем следующие предположения:

- изменчивость оператора наблюдений линейна и для любого x достаточно близкого к x_b справедливо $H(x) - H(x_b) = H(x - x_b)$, где H – линейный оператор наблюдений, представляющий собой процедуру линейной интерполяции результатов моделирования в точке наблюдений.

- ковариационные матрицы B и R – положительно определённые матрицы.

- ошибки предварительного прогноза и данных наблюдений являются случайными, т.е. $\varepsilon_b = \varepsilon_0 = 0$ и не коррелируют между собой $\varepsilon_b \varepsilon_0^T = 0$.

Линейный анализ предполагает, что анализ определяется коррекцией вектора предварительного прогноза, которые линейно зависят от разницы между предварительным прогнозом и данными наблюдений. В тоже время оптимальный анализ ищется как наиболее близкое состояние к истинному, в данном случае исходя из метода наименьших квадратов, т.е. минимизации дисперсии ошибок анализа.

Рассмотрим два принципиально различных подхода к ассимиляции данных: это стохастический и вариационный подход.

Стохастический подход основан на решении интерполяционного уравнения:

$$x_a = x_b + K(y - H[x_b]), \quad (3.3)$$

$$K = BH^T (HBH^T + R)^{-1}, \quad (3.4)$$

где K – линейный оператор, по своей сути представляющий матрицу весов. Ковариационная матрица ошибок анализа для любого K может быть определена как:

$$A = (I - KH)B(I - KH)^T + KRK^T,$$

здесь I – единичная матрица. Если использовать метод наименьших квадратов, то

$$A = (I - KH)B. \quad (3.5)$$

Задача ассимиляции при стохастическом подходе сводится к определению матрицы K .

Вариационный подход основан на решении вариационной проблемы оптимизации. В такой постановке анализ ищется как вектор состояния, при котором наблюдается минимум целевой функции J (в зарубежной литературе cost function):

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (y - H[x])^T R^{-1} (y - H[x]) = J_b + J_o, \quad (3.6)$$

Первое слагаемое целевой функции J_b связано с фоновым состоянием, второе J_o с данными наблюдений. Целевая функция является квадратичной и её минимуму будет соответствовать равенство «0» градиента функции:

$$\nabla J(x_a) = 0 = 2B^{-1} (x_a - x_b) - 2H^T R^{-1} (y - H[x_a]), \quad (3.7)$$

$$0 = B^{-1} (x_a - x_b) - H^T R^{-1} (y - H[x_a]) - H^T R^{-1} (x_a - x_b),$$

тогда

$$x_a = x_b + (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (y - H[x_a]). \quad (3.8)$$

Задача ассимиляции при вариационном подходе сводится к нахождению минимума целевой функции.

Докажем эквивалентность стохастического и вариационного подходов к ассимиляции данных при использовании метода наименьших квадратов. Для этого необходимо доказать, что

$$x_a - x_b = BH^T (HBH^T + R)^{-1} (y - H[x_b]) = (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (y - H[x_b])$$

$$\Rightarrow BH^T (HBH^T + R)^{-1} = H^T R^{-1} (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1}$$

$$\Rightarrow BH^T (B^{-1} + H^T R^{-1} H) = H^T R^{-1} (HBH^T + R). \quad (*)$$

Преобразуем правую часть (*):

$$H^T R^{-1} (HBH^T + R) = H^T R^{-1} HBH^T + H^T R^{-1} R = H^T + H^T R^{-1} HBH^T = BH^T (B^{-1} + H^T R^{-1} H)$$

что и требовалось доказать.

Итак, существуют два математически эквивалентных алгоритма решения задачи ассимиляции данных наблюдений:

– стохастический подход, основанный на прямом определении матрицы весов K;

– вариационный подход, основанный на минимизации целевой функции.

Эти алгоритмы имеют разную математическую реализацию, и их эквивалентность нарушается, как только основные гипотезы не подтверждаются, как например, линейаризация оператора наблюдений.

Основная проблема, которая возникает при реализации как стохастических, так и вариационных алгоритмов – это определение ковариационных матриц ошибок фонового состояния B и данных наблюдений R . Они не могут быть определены в прямую и моделируются соответствии с представлениями о физических процессах и технологии измерений. Другая сложность заключается в том, что в современной океанологии размерность гидротермодинамической модели в среднем составляет $n = 107$, размерность вектора данных наблюдений редко превышает $m = 104$, тогда размерность ковариационной матрицы ошибок предварительного прогноза B составит $n \times n = 1014$, $R - m \times m = 108$. Обращение матриц такого порядка требует огромных вычислительных ресурсов, что в принципе не реализуемо на современных ЭВМ. При задании ковариационной матрицы ошибок наблюдений R зачастую предполагается, что ошибки наблюдений некоррелируемы в пространстве, таким образом, R вырождается в диагональную матрицу, что позволяет задать её постоянной величиной для каждого типа наблюдений. Так, например, в оперативной модели Северного/Балтийского моря DMI-BSHcmод при ассимиляции профилей зондирования температуры и солёности, данных буйковых станций и измерений, выполненных по ходу судна (ferry boxes), в первом приближении R принималось равным стандартному отклонению данных наблюдений температуры и солёности, а именно 0.5°C и 0.5‰ . При ассимиляции спутниковой температуры поверхности моря (ТПМ) для оценки R в основном используют поставляемое разработчиком продукта поле ошибок ТПМ. Оценка ковариационной матрицы ошибок фонового состояния не менее сложная задача, пути решения этой проблемы будут рассмотрены далее при описании различных методов ассимиляции данных наблюдений.

3.4.1 Метод оптимальной интерполяции

Метод оптимальной интерполяции (ОИ) относится к стохастическим методам ассимиляции и достаточно прост для численной реализации. Математическая постановка задачи описывается уравнениями (3.3) и (3.4).

Фундаментальная гипотеза ОИ состоит в том, что для каждой переменной модели только некоторые данные наблюдений важны при опре-

делении вектора приращений (рис. 3.3). Таким образом, для каждой переменной модели x_i выбирается малое число наблюдений p_i с использованием статистических критериев (например, радиуса корреляции). Размерность ковариационных матриц ошибок вектора фоновое состояние и данных наблюдений снижается до $p_i \times p_i$. В этом случае обращение матриц небольшой размерности становится возможным и не требует больших вычислительных ресурсов.

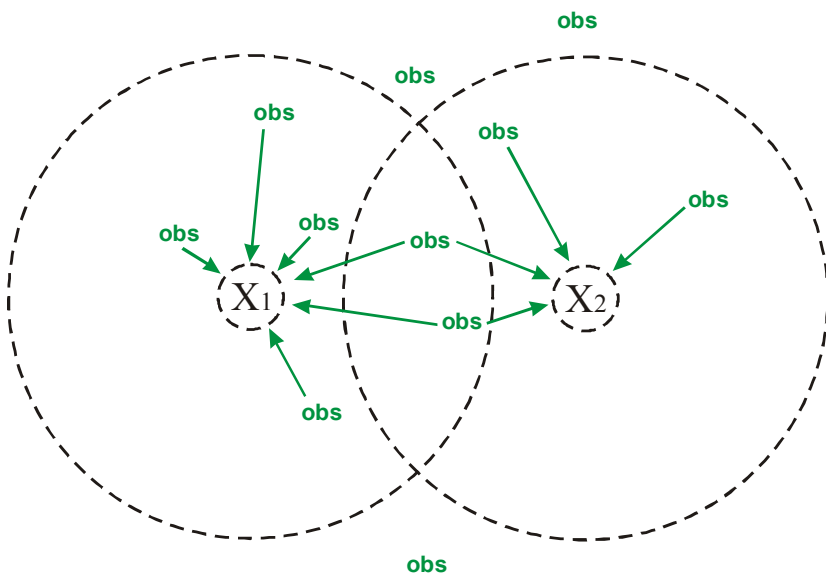


Рисунок 3.3. Одна из схем ОИ выбора данных наблюдений [7]

Применительно к Балтийскому морю в оперативной модели Балтийского моря HIROMB Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI) вполне успешно используется метод оптимальной интерполяции для усвоения спутниковой поверхностной температуры моря и вертикальных профилей температуры и солености, полученных зондированием с судна и буйковых станций. Для выявления радиуса корреляции ПТМ были проанализированы коэффициенты корреляции между различными точками с остальным полем ПТМ (рис. 3.4). Значения коэффициента корреляции 0.5 было выбрано критерием. Как видно из рис. 4 расстояние между точками в этом случае редко превышает 50 км, что и было принято за радиус корреляции при реализации алгоритма оптимальной интерполяции.

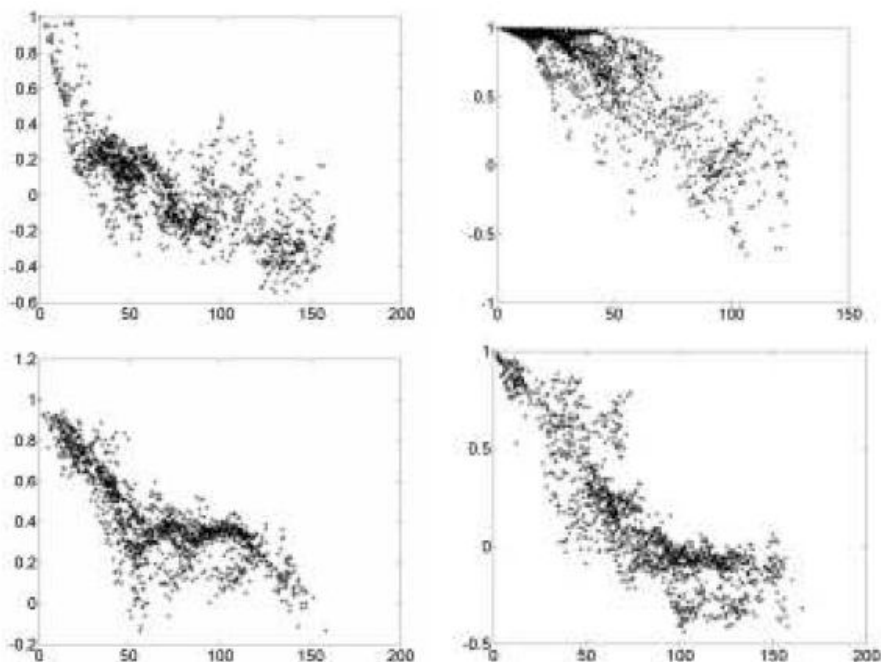


Рисунок 3.4. Значение коэффициентов корреляции между ТМП в четырех произвольно выбранных точках и остальных точках данных наблюдений. По оси абсцисс – дистанция в км, по оси ординат – значение коэффициента корреляции [15].

3.4.2. Трехмерная вариационная ассимиляция данных (3D-VAR)

Вариационный метод решения задачи ассимиляции заключается в поиске минимума некоторого функционала, описывающего “близость” модельного решения и данных измерений в некоторой заданной метрике. Для организации процедуры минимизации функционала используется уже упомянутая квадратичная целевая функция (3.6). Процедура минимизации целевой функции позволит определить искомый вектор приращений δX . Для нахождения минимума целевой функции необходимо также определить её градиент (3.7). Итерационный процесс переопределения вектора приращений продолжается до тех пор, пока градиент целевой функции не станет равен нулю в пределах какой-то наперед заданной точности, что будет соответствовать нахождению экстремума целевой функции (её минимума). Результатом процедуры ассимиляции является состояние динамичес-

кой системы (анализ x_a), которое наиболее приближенно к реальному, исходя из имеющихся данных наблюдений и предварительного модельного прогноза.

Ассимиляционная схема 3D-VAR предполагает расчёт ковариации ошибок для всех пар переменных модели, как уже отмечалось, это в принципе нереализуемо на современных ЭВМ, в связи с необходимостью обращения матрицы ковариации фоновой ошибки B . В литературе представлено множество вариантов реализации ассимиляционной схемы 3D-VAR. Рассмотрим один из способов реализации процедуры 3D-VAR. Проблема большой размерности матрицы B решается путём перехода от физического пространства, где определены все вектора состояния, к виртуальному пониженной размерности.

Представим ковариационную матрицу ошибок фонового состояния в следующем виде:

$$B = VV^T, \quad (3.9)$$

при этом целевая функция определяется с использованием нового управляющего вектора состояния v , который получается с помощью трансформирующей матрицы V^+ , близкой к обратной матрице V :

$$v = V^+ \delta x. \quad (3.10)$$

В такой постановке целевая функция и её градиент примут вид:

$$J = \frac{1}{2} v^T v + \frac{1}{2} (HVv - d)^T R^{-1} (HVv - d). \quad (3.11)$$

$$\nabla J(v) = v + V^T H^T R^{-1} (HVv - d). \quad (3.12)$$

Таким образом, разделяются два пространства: первое некое виртуальное пониженной размерности, где определён управляющий вектор v , и физическое пространство, где определены искомые приращения, а трансформирующая матрица V обеспечивает переход между ними.

Трансформирующая матрица V представляется в форме последовательности линейных операторов [21]:

$$V = V_D V_{uv} V_H V_v, \quad (3.13)$$

где V_D – оператор удаления дивергенции;

V_{uv} – оператор скорости;
 V_H – горизонтальная ковариация;
 V_V – вертикальная ковариация.

Специфика предложенного алгоритма состоит в расщеплении матрицы фоновых ошибок на горизонтальные и вертикальные компоненты. Горизонтальная ковариация моделируется с помощью рекурсивного фильтра на основе гауссовой функции, при определении которой требуется задание радиуса корреляции. Количественные оценки радиуса корреляции необходимо получать на основании статистической обработки большого количества данных наблюдений. Вертикальная компонента моделируется с помощью эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), описывающих вертикальную изменчивость за период расчёта, значительно превышающий прогнозный. На практике используются только наиболее значимые ЭОФ и их число значительно меньше размера вектора состояния модели, таким образом, размерность аргументов целевой функции также уменьшается.

Оператор скорости V_{uv} отвечает за согласованность полученных в результате ассимиляции полей с остальным решением, а именно, за внесение поправок в поля скоростей, вызванных изменениями в результате ассимиляции поля плотности. Последний оператор V_D представляет собой рекурсивный фильтр, направленный на удаления дивергентных зон в полях скорости, которые возникают вблизи береговой линии. Это связано с тем, что в открытом море оператор V_{uv} обеспечивает динамический баланс между приращениями к предварительным значениям скорости, уровня, солёности и температуры. При этом условие непротекания для нормальных к береговой линии компонент скорости не выполняется.

3.4.3. Моделирование ковариационной матрицы ошибок фонового состояния

Одной из технических проблем алгоритмов ассимиляции данных является обращение матриц фонового состояния, имеющих очень большую размерность $\sim 107 \times 107$. Одним из возможных способов понижения размерности, как было показано выше, является применение метода главных компонент или эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) при решении обратной задачи перехода от виртуального пространства пониженной размерности к физическому. В основе метода ЭОФ лежит сингулярное разло-

жение, которое применяется к ковариационной матрице ошибок фонового состояния B , согласно которому любую матрицу L , состоящую из вещественных чисел, можно представить как:

$$L = U \Sigma V^T, \quad (3.14)$$

где U и V – ортогональные матрицы. Элементы Σ_{ii} на диагонали матрицы Σ называются сингулярными числами матрицы L . Столбцы матриц U и V называются, соответственно, левыми и правыми сингулярными векторами.

Если элементы матрицы Σ упорядочить по убыванию, то ранг матрицы L можно понизить до k , заменив незначительные собственные числа нулям, тогда выражение для матрицы L_k можно переписать в следующем виде:

$$L_k = U_k \Sigma_k V_k^T, \quad (3.15)$$

где матрицы U_k , Σ_k и V_k получаются из соответствующих матриц в сингулярном разложении матрицы L обрезанием до ровно k первых столбцов. Приближая матрицу L матрицей меньшего ранга, мы выполняем своего рода сжатие информации, содержащейся в L : матрица L размера $n \times n$ заменяется меньшими матрицами размеров $n \times k$ и $k \times n$ и диагональной матрицей с k элементами. При этом сжатие происходит с потерями – в приближении сохраняется лишь наиболее существенная часть матрицы L .

Таким образом, смысл разложения по ортогональным составляющим заключается в том, что из большого числа информации, прежде всего отбираются максимальные собственные (сингулярные) числа и соответствующие им собственные (сингулярные) вектора. Именно они описывают главные особенности рассматриваемого исходного поля, причём их вклад в общую изменчивость поля определяется величиной собственного числа [23]. С увеличением порядкового номера собственных чисел собственные вектора будут описывать всё менее существенные (второстепенные) особенности исходных данных.

3.4.4. Четырёхмерная вариационная ассимиляция данных (4D-VAR)

4D-VAR представляет собой применение схемы 3D-VAR для данных, разнесённых во времени. Используется тот же математический аппарат,

но при этом сравниваются данные наблюдений, и модельное решение синхронизировано за определенный промежуток времени, так называемое ассимиляционное окно.

На определенном временном интервале анализ x_a находится на начальный момент времени, а наблюдения разнесены в пределах временного интервала, тогда y_i, x_p, x_{ii} – вектора данных наблюдений, модельного состояния и истинного состояния на момент времени i , соответственно, H_i и R_i – оператор наблюдений и ковариационная матрица ошибок наблюдений на момент времени i . В свою очередь ковариационная матрица ошибок предварительного прогноза B определяется один раз на начальный момент времени, т.е. на момент предварительного прогноза x_b и анализа x_a .

В общей постановке проблема 4-х мерного анализа формулируется как минимизация следующей целевой функции:

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \sum_{i=0}^n (y - H[x])^T R^{-1} (y - H[x]). \quad (3.16)$$

При данной постановке необходимо определить последовательность векторов состояния модельного решения x_i , как последовательность решений модельных уравнений:

$$\forall i, x_i = M_{0 \rightarrow i}(x),$$

где $M_{0 \rightarrow i}$ – оператор модельного прогноза от начального состояния до момента времени i , таким образом, 4D-VAR представляет собой нелинейную проблему оптимизации, которая в общем случае трудно разрешима. Первый член J_b целевой функции остается таким же, как в 3D-VAR, а определение второго члена J_0 требует n итераций модельного счёта с начального момента до каждого момента наблюдений i , и даже больше при расчёте градиента целевой функции ∇J_0 .

Для реализации схемы 4D-VAR на практике прибегают к следующим упрощениям:

– модельный прогноз может быть представлен как результат промежуточных модельных шагов M_i , полученных численным интегрированием модельных уравнений при начальных условиях, описываемых вектором состояния x , тогда $x_i = M_i M_{i-1} \dots M_1 x$; целевая функция может рассматриваться как квадратичная, полагая, что оператор M может быть линеаризован:

$$y_i - H_i M_{0 \rightarrow i}(x) \approx y_i - H_i M_{0 \rightarrow i}(x_b) - H_i M_{0 \rightarrow i}(x - x_b),$$

где M – дифференциал M .

Таким образом, расчёт целевой функции и её градиента требует однократного прямого численного интегрирования от начального момента до момента времени n и однократного интегрирования модифицированной сопряженной модели, представляющей собой набор линеаризованных операторов M_i .

В данной постановке алгоритм 4D-VAR имеет следующие характеристики:

- требуется построение линеаризованных операторов M_i , составляющих сопряженную модель, что представляет дополнительные трудности;
- в оперативных системах возникает необходимость накапливать данные наблюдений за весь временной интервал (ассимиляционное окно), тогда как в последовательных алгоритмах (3D-VAR) ассимиляция может проводиться по мере поступления данных наблюдений;

4D-VAR можно считать оптимальным алгоритмом, т.к. он даёт наилучшее приближение к данным наблюдений на выбранном временном интервале даже при несовершенной оценке ковариационной матрицы ошибок B .

3.4.5. Фильтр Калмана

Одним из основных методов усвоения данных наблюдений, относящихся к стохастическому подходу, является фильтр Калмана и его производные. В простой постановке фильтр Калмана представляет собой рекурсивный фильтр и может быть применен только для линейных систем. Основные уравнения фильтра Калмана уже были рассмотрены при доказательстве тождественности стохастических и вариационных методов ассимиляции данных с тем лишь уточнением, что фоновое состояние x_b заменяется прогностическим x_f , ковариационные матрицы B и A заменяются на P_f и P_a , чтобы подчеркнуть факт, что теперь фоновое состояние – это прогноз, а ковариационная матрица ошибок фонового вектора состояния эволюционирует во времени. Основные уравнения фильтра Калмана записываются в следующем виде:

$$x_f(i) = M_{i-1 \rightarrow i} x_a, \quad (3.17)$$

$$P_f(i) = M_{i-1 \rightarrow i} P_a M_{i-1 \rightarrow i}^T + Q(i), \quad (3.18)$$

$$K(i) = P_f(i)H^T(i)[H(i)P_f(i)H^T(i) + R(i)], \quad (3.19)$$

$$x_a(i) = x_f(i) + K(i)[y(i) - H(i)x_f(i)], \quad (3.20)$$

$$P_a(i) = [I - K(i)H(i)]P_f(i), \quad (3.21)$$

где $Q(i) = M_{i-1 \rightarrow i}x_i(i-1) - x_i(i)$ – ковариационная матрица ошибок модели, остальные обозначения прежние.

Таким образом, фильтр Калмана представляет собой последовательный алгоритм, в котором ищется решение с учётом данных наблюдений (в момент анализа), прогноза на интервале между предыдущим и текущим сроком анализа и ковариациями полей фонового состояния.

Уравнения прогностической модели используются для экстраполяции во времени ковариаций ошибок анализа, которые включают ковариации ошибок самой прогностической модели. Главное различие вариационных методов и фильтра Калмана заключается в том, что на каждом последующем цикле анализа фильтра Калмана прогнозируется ковариационная матрица ошибок фонового состояния в отличие от вариационных методов, где B не эволюционирует.

Использование фильтра Калмана предполагает следующие ограничения:

- ошибки фонового вектора состояния, наблюдений, а также модели независимы;
- ошибки наблюдений и фонового вектора состояния имеют гауссово распределение;
- средние ошибки наблюдений и фонового вектора состояния равны нулю.

Следовательно, при применении фильтра Калмана на каждом временном шаге выполнения ассимиляции линейный оператор модели действует на вектор состояния и переводит его в другой вектор состояния, добавляя некоторый вектор нормального шума (случайные факторы).

Корректное применение данного метода возможно только для линейных систем, в случае же сильной нелинейности модели и/или негауссовского шума возможно получить оценки неизвестной ковариационной функции методом Монте-Карло (ансамблевый фильтр Калмана) и затем решить соответствующее уравнение линейного оптимального фи-

льтра. Один из методов, адаптированных для нелинейных систем, получил название расширенный фильтр Калмана (extended Kalman filter): нелинейные уравнения, описывающие динамику системы, линеаризуются относительно предыдущего состояния системы, итеративный цикл позволяет найти необходимую оценку состояния динамической системы (эта оценка не обязательно будет оптимальной).

Резюмируя, можно отметить, что последние тенденции развития ассимиляционных систем направлены на объединение преимуществ 4D-VAR и алгоритмов фильтра Калмана. В оперативных системах при коротких периодах усвоения 4D-VAR является очень эффективным методом анализа. При использовании расширенного фильтра Калмана на каждом шаге усвоения определяется новая оценка ковариации, ошибки прогноза для следующего анализа. Компромисс между этими алгоритмами, а также применение ансамблевого прогнозирования обеспечивает достижение наилучшего результата. Отметим также, что использование современных методов ассимиляции данных наблюдений позволяют получать множество побочных продуктов высокого качества. Наглядным примером служат поля ре-анализа, которые могут быть использованы в качестве диагностических средств для улучшения алгоритмов усвоения и прогностических свойств оперативной системы.

ГЛАВА 4. ОПЕРАТИВНЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ФИНСКОГО ЗАЛИВА

В настоящее время для региона Балтийского моря в составе единого оперативного комплекса, разработанного совместными усилиями специалистов Германии, Швеции, Дании и Нидерландов, используются прогностическая модель атмосферы HIRLAM, the High Resolution Limited Area Model, (<http://hirlam.org>) и трёхмерная модель моря HIROMB, High Resolution Operational Model of the Baltic Sea. Используемая версия атмосферной модели HIRLAM имеет разрешение 11 км. Расчётная область HIROMB покрывает Северное и Балтийское моря. Горизонтальное разрешение модели в Балтийском море, проливах Скагеррак и Каттегат составляет 1 морскую милю, число слоев равно 24. Модель объединена с гидрологической моделью HBV, дающей ежедневно сток основных рек, впадающих в Балтийское море.

Прогноз состояния Балтийского моря в рамках указанного модельного комплекса считается в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)) ежедневно на предстоящие 48 часов и выдаётся через каждые 3 часа. Результаты прогноза доступны через 5 – 6 часов после начала расчёта в виде различных продуктов, таких как предупреждения о наводнениях и прогноз вдоль маршрутов судов. Прогностические гидрофизические поля верхних 16 водных слоев, наряду с полями скорости ветра и давления в атмосферном пограничном слое, являются входной информацией для ещё одной модели комплекса (SeaTrack), предназначенной для мониторинга и прогноза распространения нефтяных загрязнений по морской акватории. В SMHI разработано специальное программное обеспечение (SeaTrackweb), позволяющее пользователю получать через Internet прогнозы дрейфа нефтяных пятен в Балтийском море. Пользователь имеет возможность непосредственного доступа к последним прогнозам на 48 часов скоростей ветра и течений. В настоящее время почти все страны Балтийского региона, включая Россию, являются членами сообщества HIROMB.

Одним из первых примеров разработки элементов оперативной океанографической системы в Северо-Западном регионе (СЗР) России является создание в РГГМУ совместно со специалистами Санкт-Петербургского отделения института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, а также Арктического и Антарктического научно-исследовательского

института прототипа современной оперативной системы прогноза состояния вод Финского залива и распространения загрязнений [Карлин Л.Н. и др., 2010].

Создание оперативной системы прогноза на основе модельного комплекса является весьма актуальным и необходимым для российского сектора прибрежных акваторий Балтийского моря, где наряду с частыми природными катастрофами велик риск техногенных катастроф, наносящих ущерб природной среде, экономике и населению этого важнейшего региона России. Особенно высока актуальность прогноза поведения нефтяных пятен на акватории Финского залива, в связи с резким ростом в последнее десятилетие вероятности аварийных разливов нефти в Финском заливе, вызванных увеличением объема её морских перевозок и строительством портов и нефтяных терминалов (Усть-Луга, Приморск, Высоцк). Морской трафик в Финском заливе в последнее десятилетие растёт очень динамично [Рябченко В.А., 2008]. Объём нефти, транспортируемой через залив увеличился с 20 до 104 миллионов тонн за период с 1995 до 2004 г. По оценкам финских специалистов этот объём может достичь 200 миллионов тонн уже в 2010 г.

Опасность аварийных разливов нефти многократно возрастает в случае нагонных наводнений в Финском заливе и Невской губе, возникающих при прохождении глубоких циклонов над Балтийским морем. В Санкт-Петербурге за его 300-летнюю историю произошло почти 300 наводнений, из них 48 – за последние 25 лет. Для прогноза наводнений и борьбы с ними в регионе и Санкт-Петербурге в течение многих лет проводятся научные исследования по гидрологии и морской метеорологии. Оперативный прогноз этого опасного явления составляется в Гидрометцентре Санкт-Петербурга синоптическими методами. Гидродинамический прогноз в его нынешнем виде применяется в качестве вспомогательного, что связано с недостаточной точностью, которая в значительной мере обусловлена неточностями прогноза входных атмосферных параметров. Поэтому уточнение метеорологического прогноза – необходимое условие уточнения прогноза наводнений и повышения его заблаговременности.

4.1 Структура оперативной прогностической системы GULFOOS

Оперативная прогностическая система, основанная на трёхмерной гидродинамической модели, разработана по аналогии с известной системой

BOOS (the Baltic Operational Oceanographic System) и названа GULFOOS (the Gulf of Finland Operational Oceanographic System).

Схема оперативной системы прогноза приведена на рис. 4.1. Она включает следующие модули: 1) гидродинамический модуль GOFM (the Gulf Of Finland Model), 2) модули метеорологических данных, граничных условий на входе в залив и речного стока, 3) модуль инициализации модели, 4) модуль выходных данных, 5) модуль ассимиляции спутниковых данных о температуре поверхности моря (ТПМ).

Гидродинамический модуль представляет собой трёхмерную гидродинамическую модель циркуляции воды и морского льда. Модель циркуляции воды основана на полных уравнениях гидротермодинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, включающих уравнение состояния морской воды Миллера и Кремлинга. Вертикальная турбулентность описывается на основе оригинальной b-l схемы замыкания (b – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, l – их пространственный масштаб). Основные прогнозируемые переменные модели – скорость течений, температура, солёность и плотность воды, изменения уровня моря.

Модель морского льда описывает динамику и термодинамику снежно-ледяного покрова и позволяет прогнозировать изменения скорости дрейфа льда, его толщины и площади. Модель интегрируется на сферической сетке для всего Финского залива с шагом по горизонтали 1 морская миля и вертикальным разрешением 1 м.

В модулях входной информации (метеорологических данных, граничных условий на входе в залив и речного стока) задаются необходимые граничные условия. При прогнозе гидродинамики Финского залива в качестве граничных условий используются: 1) прогноз состояния атмосферы (приземное давление, скорость ветра, облачность, температура и относительная влажность воздуха в приводном слое), производимый по модели HIRLAM, 2) прогноз гидрологических характеристик (уровень моря, температура и солёность воды) на входе в Финский залив, выполняемый по оперативной модели Балтийского моря HIROMB (High Resolution Operational Model for the Baltic Sea), 3) климатические, средние месячные расходы крупных рек, впадающих в Финский залив (Нева, Луга, Нарва, Кумиоки). В используемой версии модели GOFM предполагается, что разность осадков и испарения равна нулю.

Используемая версия атмосферной модели HIRLAM имеет пространственное разрешение 11 км и даёт прогноз состояния атмосферы на 48 часов. Расчётная область трёхмерной модели HIROMB, разработанная в

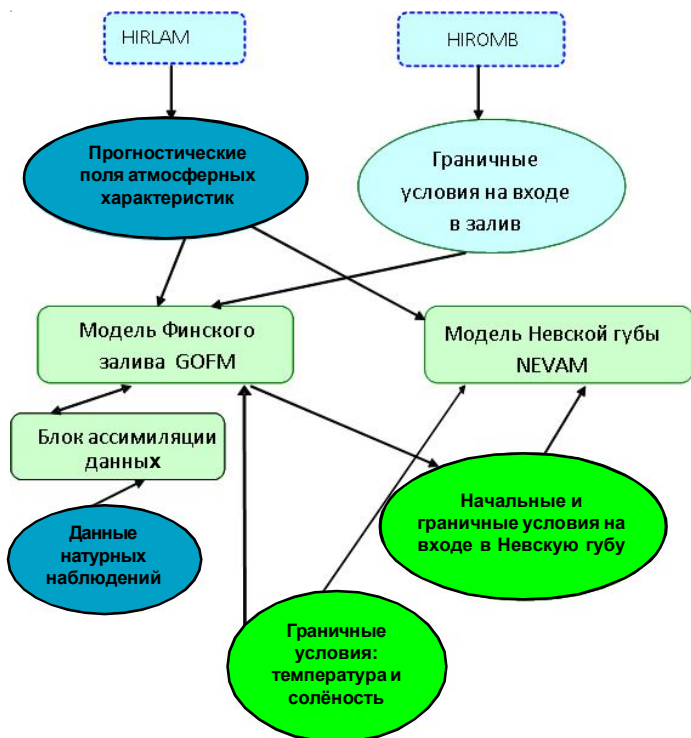


Рисунок 4.1. Оперативная океанографическая прогностическая система для Финского залива GULFOOS. Пунктиром о контурена планируемая, но пока нереализованная часть системы, предназначенная для ассимиляции ТПМ

SMHI (Шведский институт метеорологии и гидрологии) включает в себя Северное и Балтийское моря. Горизонтальное разрешение модели в Балтийском море, включая проливы Скагеррак и Каттегат, составляет 1 морскую милю. Модель имеет 24 слоя по вертикали с разрешением 4 м. Модель даёт прогноз скорости течений, уровня моря, температуры и солёности воды, скорости дрейфа льда, его толщины и сплоченности на 48 часов вперед.

Прогнозы гидрологических характеристик в Финском заливе осуществляются на основе гидродинамического модуля (модель GOFM) с использованием модулей входной информации. Оперативная океанографическая система реализована на вычислительном сервере Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ), построенном на двух 4-х-ядерных процессорах Intel Xeon. РГГМУ получает результаты

ежесуточных прогнозов на 48-часов по моделям HIRLAM и HIROMB в режиме реального времени с марта 2009г. Частота записей прогностических полей для обеих моделей составляет 1 час. При инициализации оперативного счёта по модели GOFM (прогнозы на 48 часа) на первом шаге по времени (10 марта 2009 г.) в качестве начальных условий использовались результаты расчётов по модели HIROMB. Для последующих прогнозов в качестве начальных условий берутся прогностические поля через 24 часа после начала предыдущего прогноза. Расчёты по модели GOFM полностью автоматизированы: после приёма граничные условия на входе в Финский залив и на границе с атмосферой форматируются и интерполируются на расчётную сетку GOFM, передаются в расчётный модуль для выполнения прогноза, результаты которого архивируются. Оперативная система предусматривает процедуру ассимиляции как спутниковых, так и контактных данных. В случае налаженной процедуры приема и обработки спутниковых данных о ТПМ, как показывает рис. 4.1, эти данные используются для коррекции начальных условий.

Пуск в эксплуатацию нескольких автоматических комплексов измерений вертикальных распределений температуры и солёности на акватории российского сектора Финского залива и организация приёма этих данных в режиме реального времени позволит расширить процедуру коррекции начальных условий, включив в неё ассимиляцию указанных данных контактных измерений. Для ассимиляции профилей температуры и солёности предполагается использовать методы, основанные на вариационных алгоритмах.

4.2. Результаты прогностических расчётов

В настоящее время полноценная оценка точности прогнозов возможна для уровня моря, мониторинг которого в Финском заливе осуществляется на ряде российских и зарубежных гидрометеостанций (Кронштадт, Горный Институт, Хельсинки и др.). Определенные выводы могут быть сделаны также для температуры и солёности воды, для которых на станциях имеются результаты измерения вертикальных профилей этих характеристик, выполненных во время экспедиций РГГМУ. Ниже приводятся первые результаты сравнения модельных прогнозов с данными наблюдений. Результаты расчётов вертикальных профилей температуры и солёности воды по модели GOFM сравниваются также с аналогичными расчётами по модели HIROMB.

Уровень моря в восточной части Финского залива. На рис. 4.2 приводятся примеры расчёта уровня в пункте Кронштадт (на каждом фрагменте дана совокупность первых 24 часов пяти последовательных 48-часовых прогнозов). Как видно, в целом модель правильно воспроизводит изменения уровня. Вместе с тем, ошибки расчёта высот максимальных подъёмов воды и времени наступления пиков в ряде случаев оказываются существенными. Для первого из рассматриваемых периодов (2 – 6 сентября 2009 г.) модельные пики запаздывают по сравнению с наблюдаемыми на 2 часа, модель завышает высоту пика 4 сентября на 8 см и занижает высоту пика 6 сентября на 23 см. Для второго периода (9 – 13 октября 2009 г.) модельный пик 10 октября запаздывает на 1 час, а время наступления модельного пика 13 октября практически совпадает с наблюдаемым уровнем. Воспроизведение высот пиков в этот период также оказывается лучше: разница в высотах равна 3 см для пика 10 октября и 9 см для пика 13 октября.

Температура и солёность. Ниже анализируются результаты прогноза по моделям GOFM и HIROMB вертикальных профилей температуры и солёности в восточной части Финского залива в те периоды годового цикла, для которых имеются данные наблюдений. Результаты прогнозов сравниваются с данными экспедиции РГГМУ с уникальными данными для весеннего периода, полученными в апреле 2010 года, что показано на рис. 4.3. Модельные профили, показанные на рисунках, соответствуют точке сетки, ближайшей к рассматриваемой станции и моменту начала измерений на станции. Как видно, обе модели в целом удовлетворительно воспроизводят вертикальное распределение температуры в весенний период как показывают рис. 4.3а, 4.3в.

Приведённые выше первые результаты сравнения модельных прогнозов уровня с данными наблюдений на гидрометеостанции Кронштадт свидетельствуют о том, что GOFM в целом правильно воспроизводит изменения уровня в восточной части Финского залива. Следует отметить, что качество воспроизведения температуры воды и уровня моря существенно улучшается за счёт включения в GOFM блока ассимиляции данных спутниковых измерений ТПМ и измерений уровня на части гидрометеорологических станций. При этом данные оставшихся станций используются для сравнения результатов вычислений.

Как было показано, при воспроизведении вертикального распределения солёности более успешной оказалась GOFM. Вместе с тем, обе модели

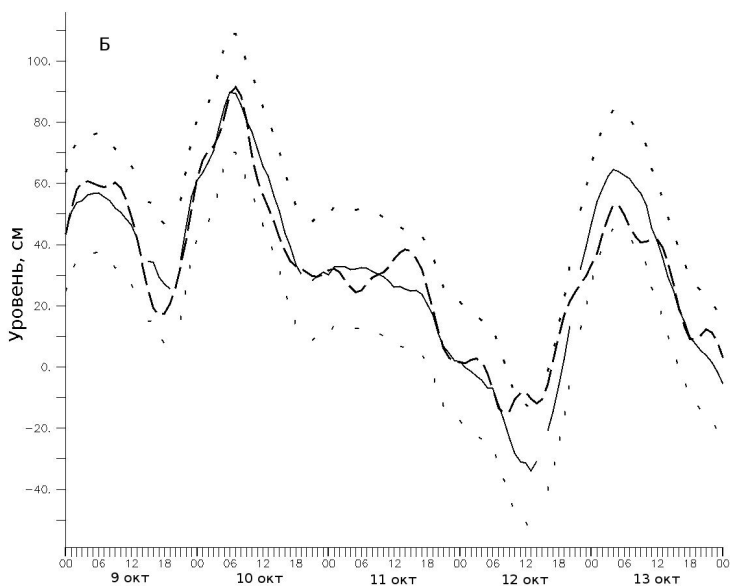
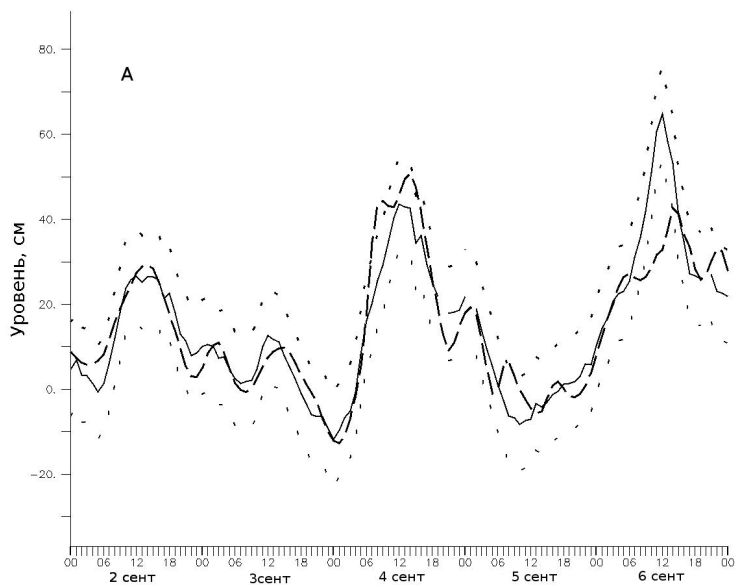


Рисунок 4.2. Прогноз уровня моря в Кронштадте по модели GOFM (пунктирные кривые) для периодов: 00 часов СГВ 02.09. 2009г. – 24 часа СГВ 06.09.2009г. (а) и 00 часов СГВ 09.10.2009г. – 24 часа СГВ 13.10.2009г. (б) Сплошные кривые – данные наблюдений, точечные кривые – данные $\pm 0.67\sigma$, отклонение

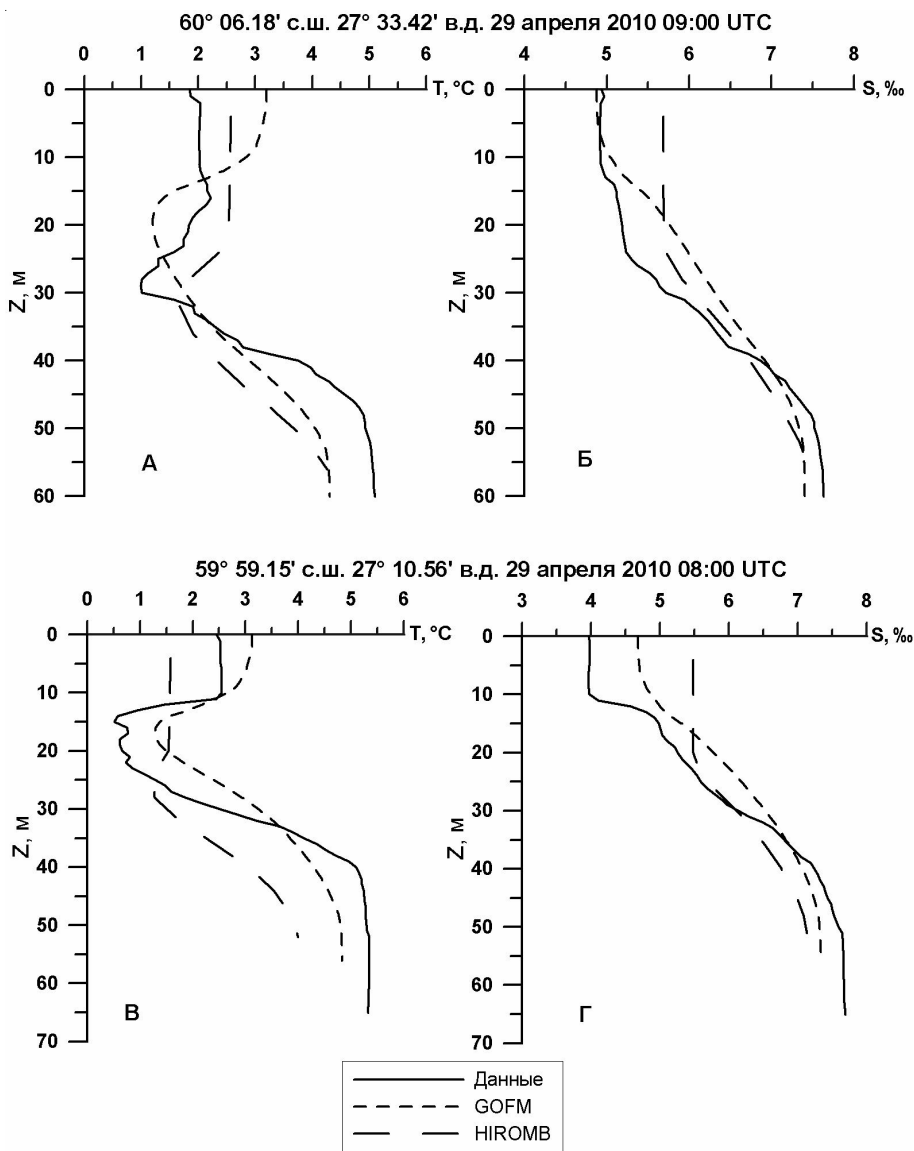


Рисунок 4.3. Вертикальное распределение температуры T и солёности S
на двух станциях в восточной части Финского залива,
29 апреля 2010 года

систематически завышают значения солёности в ВПС. Это расхождение результатов расчётов с натурными данными связано, скорее всего, с заданием в обеих моделях климатических средних месячных, а не текущих значений расходов реки Невы. Разработка процедуры использования срочных данных о расходе Невы и других рек, впадающих в Финский залив, в системе GULFOOS, наряду с подключением блока ассимиляции данных спутниковых измерений ТПМ, - первоочередные задачи по усовершенствованию системы. Решение этих задач будет способствовать улучшению качества прогноза.

Для визуализации результатов прогнозов на сервере РГГМУ создан специальный сайт <http://gulfoos.rshu.ru>, на котором представлено описание прогностической системы и основные прогнозируемые параметры: температура, солёность и уровень, что отражено на рис. 4.4 и 4.5.

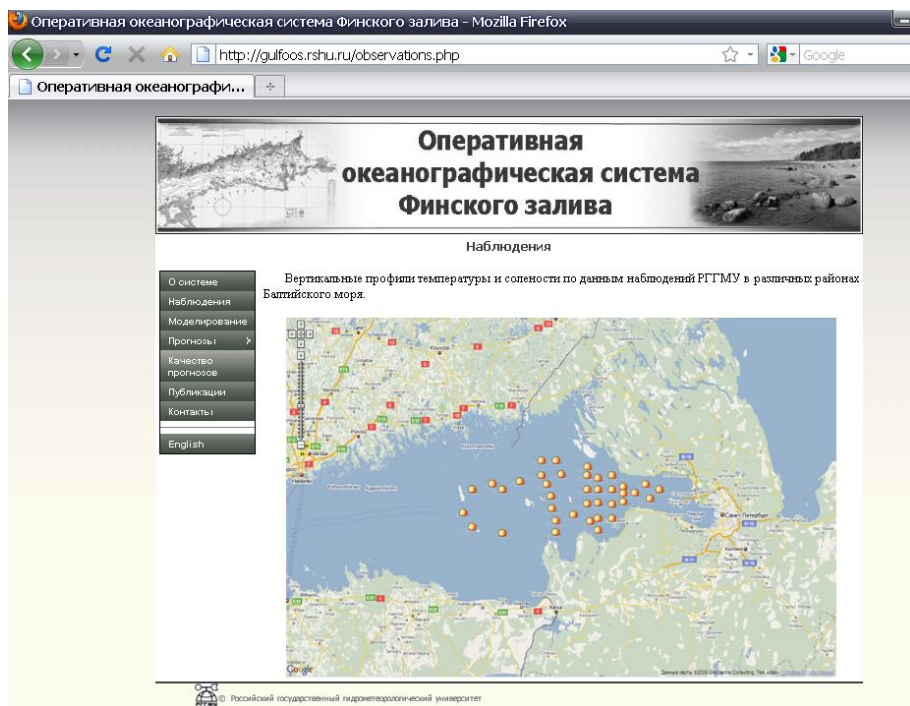
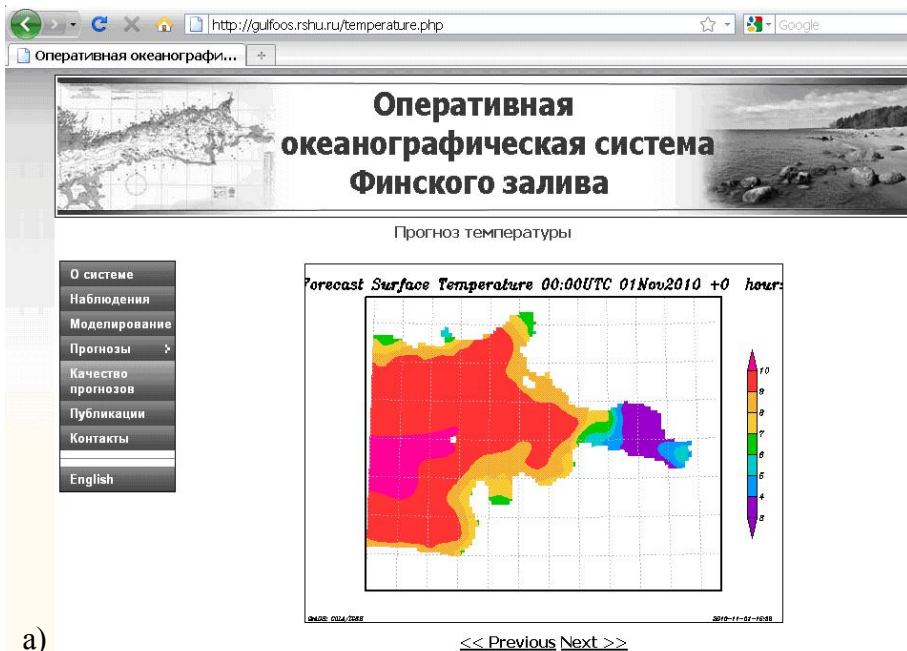
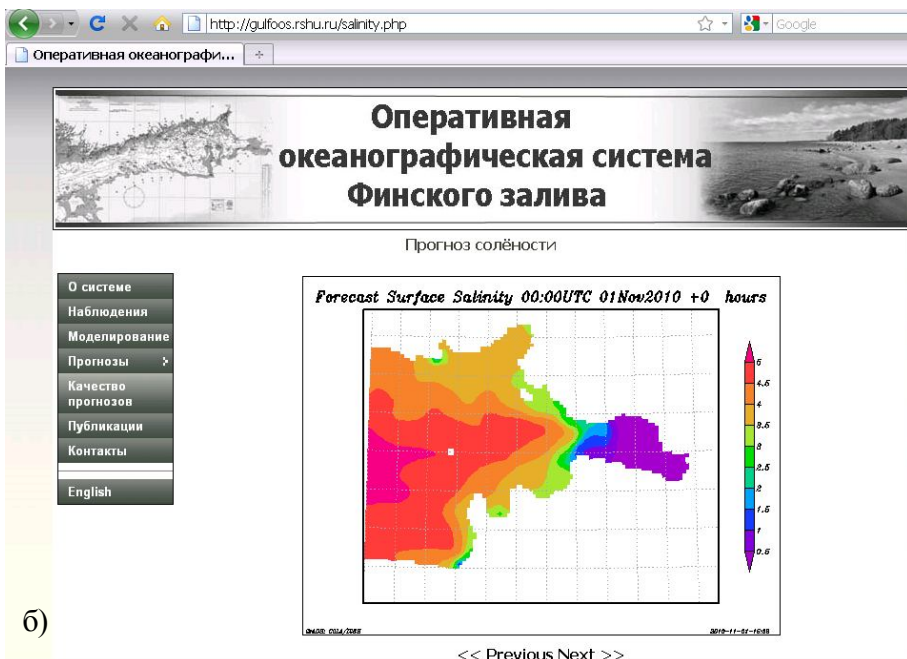


Рисунок 4.4. Визуализация результатов прогнозов на сервере РГГМУ



а)



б)



Рисунок 4.5. Визуализация результатов прогнозов на сервере РГТМУ, (а) прогноз температуры, (б) прогноз солености, (в) прогноз хода уровня

4.3. Оперативный прогноз распространения и трансформации нефтяного загрязнения в Финском заливе

Для прогноза распространения нефтяных загрязнений в Финском заливе к оперативной системе GULFOOS подключён модуль, основанный на модели OilMARS (Oil Spill Model for the Arctic Seas), разработанной в ААНИИ для расчётов переноса и трансформации нефтяного загрязнения в арктических морях [Становой и др., 2007]. Модель переноса и трансформации нефтяных загрязнений OilMARS адаптирована к акватории Финского залива и представляет отдельный модуль, который подключается к ООС Финского залива в случае возникновения аварийной ситуации (а) или поступления информации о наличии пятна нефтяного загрязнения (б) на акватории залива (рисунок 4.6).

а) При выборе аварийного разлива вводятся параметры разлива, к которым относятся координаты выброса (географические), дата и время выброса, нефтепродукт (пользователю предлагается выбрать нужный неф-

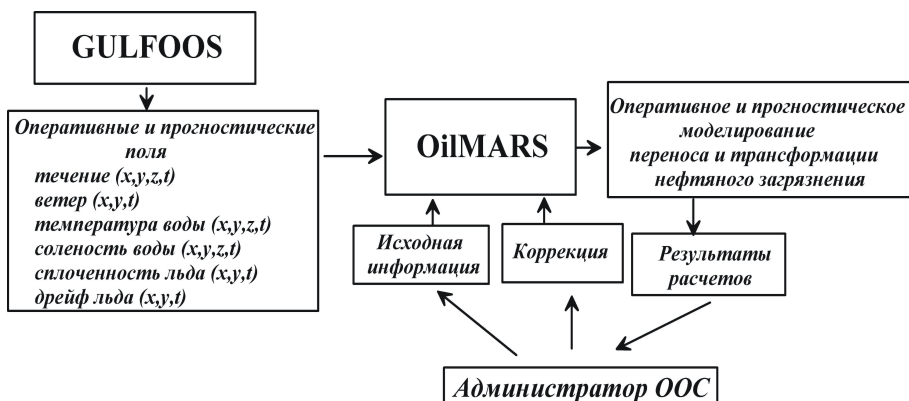


Рисунок 4.6. Схема оперативно-прогностической модели распространения нефтяного загрязнения

тепродукт из базы данных, в которой содержатся необходимые для расчёта физико-химические свойства нефтепродуктов), объём нефтепродукта на борту аварийного судна (т.е. максимально возможный объём выброса), тип выброса – продолжительный или мгновенный. В случае продолжительного выброса (наиболее вероятный случай) задаются начальная скорость выброса (т/час) и скорость выброса через какой-то промежуток времени (т.е. временной градиент скорости). До момента коррекции расчёт производится при постоянной скорости выброса (при равенстве двух скоростей) или при линейно убывающей/возрастающей скорости выброса (при неравенстве скоростей). В модели предусмотрен случай, когда источник загрязнения продолжает двигаться. При этом задаются скорость источника в узлах и направление, которые считаются постоянными до момента коррекции. В случае мгновенного выброса задается объём выброса. В модели предусмотрены варианты расчёта мгновенного выброса на воду и на поверхность льда.

б) Для расчёта распространения нефтяных пятен на поверхности моря в модели предусмотрены варианты известного и неизвестного нефтепродукта. В обоих случаях вводятся дата и время обнаружения пятен, ориентировочная толщина пятен (по умолчанию - 10 мкм), в случае расчёта распространения пятен известного нефтепродукта дополнительно вводится нужный нефтепродукт из базы данных. Вводятся географические координаты точек и метод аппроксимации. Пользователь в режиме диалога вводит необходимую для расчёта исходную информацию, в которую входят вид загрязнения, параметры разлива и параметры расчёта.

Поскольку при оперативном расчёте отсутствуют какие-либо сценарии развития как гидрометеорологических параметров, так и параметров разлива, то в модель введена процедура коррекции информации, которая может быть разделена на две части:

- коррекция параметров разлива (или ассимиляция оперативной информации), производимая на основании оперативной информации с аварийного судна или на основе данных аэрофотосъёмок и спутниковой информации: изменение координат аварийного объекта; прекращение выброса и поступления нефти на водную поверхность (например, в результате устранения пробоины в борту судна), изменение скорости выброса, изменение скорости и направления аварийного судна. Также предусмотрена возможность коррекции положения пятна и появление в процессе расчёта новых пятен.

- коррекция параметров расчёта, включающая в себя изменение периода возможной коррекции; периода прогноза; периода выдачи результатов расчета; периода расчёта и полное прекращение расчёта, когда в результате оперативных мероприятий по ликвидации разлива дальнейший расчёт становится нецелесообразным.

Для адаптации модели переноса и трансформации нефтяных загрязнений OilMARS к акватории Финского залива учитывалось, что залив представляет собой мелководный и распреснённый бассейн с интенсивной динамикой вод, хорошо развитым ветровым волнением и низкой плотностью воды. Кроме того, залив является замерзающим бассейном, имеющим ледовый покров около половины года.

Модель OilMARS работает в трёхмерном варианте, рассчитывая внутриводное распространение дисперсионного шлейфа и нефти, погружившейся в воду [Становой и др., 2012]. Модель способна рассчитывать появление и распространение вторичного нефтяного загрязнения на поверхности воды и загрязнение морского дна. Кроме того, в ней предусмотрена возможность учёта влияния сплоченности и дрейфа ледяного покрова на распространение загрязнения, а также попадание нефти на верхнюю поверхность ледяного покрова и под лед в результате сжатия дрейфующего льда.

Длительный аварийный нефтяной разлив представляется в виде большого числа маленьких дискретных разливов – порций или спиллетов (от англ. spillet), которые с определенной периодичностью поступают от источника загрязнения на поверхность воды, в зависимости от скорости разлива, в общем случае переменной во времени. Каждый спиллет имеет набор параметров: координаты, площадь, плотность и вязкость нефти, количество нефти на поверхности воды, количество испарившейся нефти

и т.д. Все параметры спиллетов зависят от времени нахождения данного спиллета на поверхности воды. Используемый в модели подход даёт возможность учесть пространственную неоднородность нефтяного пятна, т.е. в каждый момент времени на поверхности воды находятся спиллеты с разной плотностью, вязкостью, массой и площадью.

Для расчёта переноса спиллетов применяется Лагранжев подход и используется расчётная сетка из модели циркуляции воды (рис. 4.7). Перенос спиллетов происходит под воздействием ветра, течений и волн. Кроме того, учитывается случайный перенос спиллетов за счёт горизонтальной мезомасштабной турбулентности на поверхности моря:

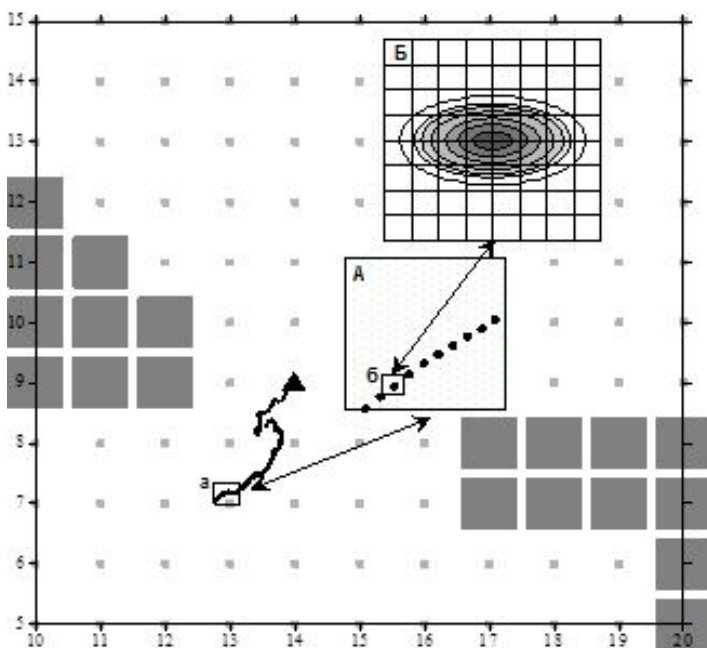


Рисунок 4.7. Схема применения лагранжево-эйлерова подхода к описанию переноса и трансформации аварийного разлива нефти. Области, помеченные строчными буквами, соответствуют врезкам, помеченным прописными буквами.

На осях – сеточные координаты

Для определения вектора суммарных течений используются результаты расчётов на гидродинамической модели. Ветровая составляющая переноса спиллета принимается по величине равной 3% от скорости ветра с отклонением от направления ветра на 15° по часовой стрелке.

Расчёт параметров ветровых волн производится либо с использованием модели ветрового волнения, либо с использованием полуэмпирических зависимостей для развитых волн.

При наличии ледяного покрова, по наблюдениям и результатам ретроспективного моделирования, скорость переноса нефти существенно уменьшается в зависимости от сплоченности льда, и направление переноса нефтяного пятна отклоняется на угол до 60° от предвычисленного направления переноса без учёта ледяного покрова. При заходе спиллета в зону большей сплоченности льда производится соответствующее уменьшение площади спиллета с сохранением массы.

При расчётах распространения нефти в ледовых условиях обычно принимается, что при сплоченности льда более 5 баллов нефть движется вместе со льдом. Но, как показали результаты наблюдений за реальным разливом, нефть может двигаться быстрее, чем дрейфующий лед. Поэтому в модели принимается, что при сплоченности льда более 5 баллов спиллет будет переноситься со скоростью дрейфа льда только при условии, если скорость дрейфа льда больше скорости переноса спиллета.

Для расчёта процессов трансформации нефти используется подход Эйлера и сетки с высоким пространственным разрешением, зависящим от начальной массы спиллетов. При подходе спиллета к берегу или припаю используются условия непротекания и скольжения. При этом фиксируется участок загрязненной береговой линии.

Процесс эволюции каждого спиллета проходит две стадии: растекания и трансформации. Для расчёта растекания нефти до состояния пленки в модели используется стандартный подход [Reed et al., 1999]. Вследствие малого объёма спиллета, процесс растекания занимает всего несколько часов, в течение которых происходит испарение легких фракций нефти и соответствующее уменьшение объёма спиллета. Кроме того, учитывается сплоченность ледяного покрова. При этом растекающийся спиллет переносится по поверхности моря. После завершения растекания производится адаптация пятна на прямоугольную расчетную сетку с учётом ветрового воздействия. В зависимости от задаваемой скорости разлива, начальная масса спиллетов может быть разной. Поэтому для каждого спиллета формируется своя расчётная сетка, пространственное разрешение которой зависит от массы данного спиллета.

Дальнейший расчёт трансформации каждого спиллета производится путём решения уравнения диффузии для неконсервативной примеси относительно массы нефти.

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы каждого спиллета.

Для расчёта процесса испарения нефти в модели используется псевдокомпонентный метод, при этом учитывается влияние увеличения вязкости в результате образования эмульсии. Влияние ледяного покрова косвенно учитывается за счет уменьшения площади спиллета.

При расчёте процесса горизонтальной диффузии используется коэффициент диффузии, зависящий от пространственных размеров пятна примеси. Кроме того, в расчётную формулу введены два дополнительных коэффициента, зависящие от изменения вязкости нефти и от сплоченности ледяного покрова. Также используется дополнительное условие ограничения величины коэффициента диффузии, связанное с численной реализацией уравнения.

Расчёт вертикальной дисперсии нефти в воду при обрушении ветровых волн, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде» и шлейф загрязнения в верхнем слое моря с возможной последующей адсорбцией капель нефти на взвешенных минеральных частицах, производится с помощью широко используемого в мировой практике метода. При слабых и умеренных ветрах вклад вертикальной дисперсии во внутриводное загрязнение достаточно мал, но в штормовых ситуациях, когда возрастает риск аварийных разливов, вклад вертикальной дисперсии значительно увеличивается. Так, при аварии танкера «Braer», произошедшей в 1993 году у Шетландских островов, шторм перемешал до 40 % поступившей в воду нефти по всей толщине слоя воды. Эта масса нефти переносилась течениями в противоположном ветру направлении, при этом только около 15 % осело на дно.

Для образования эмульсии «вода в нефти» необходим минимальный уровень поступающей энергии, которая зависит от скорости ветра и волновых параметров. Отмечается, что при скорости ветра более 12 м/с достаточно быстро происходит дисперсия нефти в воду и эмульсия «вода в нефти» почти не образуется. Кроме того, необходимо, чтобы в нефти было высокое содержание смол и асфальтенов.

В модели рассчитывается энергетический уровень и индекс стабильности для определения устойчивости эмульсии. В случае благоприятном для образования эмульсии, производится расчёт этого процесса. В модели реализовано два метода расчёта процесса образования эмульсии в зависимости от наличия информации о содержании асфальтенов, смол и парафинов в нефти.

Сырая нефть REBCO (Russian Export Blend Crude Oil), проходящая через нефтяные терминалы северо-запада России, содержит большой процент асфальтенов и смол, что при определенных условиях приводит к образованию устойчивой эмульсии типа «вода в нефти».

При испарении легких фракций нефти и при образовании эмульсий «вода в нефти» значительно увеличиваются плотность и вязкость нефти. Кроме того, плотность и вязкость нефти зависят от изменчивости температуры воды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в замерзающих морях. Для расчёта изменений плотности и вязкости нефти обычно применяются полуэмпирические соотношения.

В результате увеличения плотности нефти может быть достаточно небольшого изменения температуры воды или выноса пятна нефти в зону с меньшей поверхностной плотностью воды (зона влияния речного стока, прикромочная ледовая зона), чтобы нефть оказалась тяжелее воды в поверхностном слое и начала тонуть.

Глубина погружения и концентрация загрязнения зависят от плотности, площади и массы затонувшей нефти и плотностной структуры воды. При длительном разливе нефти может возникнуть множество очагов внутриводного загрязнения с различной плотностью нефти, которые, в зависимости от положения и мощности пикноклина, будут располагаться на разных глубинах. Под действием течений и турбулентности будет происходить пространственное распространение и перемешивание нефтяного загрязнения, которое может осесть на отмелях и банках, либо, в зависимости от пространственной неоднородности плотности воды, может выйти на поверхность, образуя вторичный очаг загрязнения поверхности моря.

При моделировании продолжительных разливов, плотность данного объема нефти (спиллета) зависит от времени его нахождения на поверхности воды и физико-химических свойств нефти. Вследствие пространственной изменчивости поверхностного поля плотности воды, различные спиллеты могут погружаться в воду в различное время и в различном месте, когда плотность данного спиллета будет превышать плотность воды на поверхности моря в данной точке. Вследствие этого внутриводное загрязнение имеет многоядерную структуру.

Внутриводное загрязнение является достаточно распространенным явлением. Измерения уровня загрязнения нефтеуглеводородами Балтийского моря и Финского залива, проведенные в 80-ые годы, показали, что на поверхности моря в виде пленки содержится менее 4% загрязнения, 15% загрязнения содержится в донных осадках и около 80% загрязнения

содержится в воде в виде эмульсий, коллоидных растворов, взвесей и др. Отметим, что внутриводное загрязнение может быть зафиксировано только прямыми методами измерений (взятием проб воды для определения концентрации нефтеуглеводородов), при этом дистанционные наблюдения с помощью ИСЗ покажут только очищение поверхности воды от нефти.

При разработке модельного блока расчёта внутриводного распространения нефти предполагалось, что концентрация нефти и динамика процессов распространения не зависят от состояния нефти в воде (коллоидный раствор, эмульсия, взвешенные капли и т.д.). Предполагается также, что нефть, попавшая в воду под действием ветровых волн (эмульсия типа «нефть в воде») имеет плотность, равную плотности воды в поверхностном слое в точке, где произошла дисперсия нефти. Для расчёта формируется сеточная область с горизонтальным разрешением (Δx_3 и Δy_3), зависящим от характерных размеров спиллетов и условий устойчивости расчётной схемы. Вертикальное разрешение совпадает с гидродинамической моделью.

Для расчёта распространения нефтяного загрязнения в воде использовалось численное решение трёхмерного уравнения адвекции - диффузии для вязкой примеси.

Так как плотность и вязкость в разных очагах загрязнения могут быть различны, и предполагается, что они остаются неизменными, уравнение адвекции и диффузии решается одновременно для концентрации нефтеуглеводородов и произведений концентрации на плотность и вязкость. Соответственно, выражения для источников также входят в уравнения в виде источника концентрации и соответствующих произведений. Для уравнения относительно концентрации:

- на твёрдых границах задается условие непротекания, на жидких границах – свободное протекание (вынос загрязнения из расчётной области).

- на нижней границе ($z = H$) задаётся условие непротекания в общем случае или мгновенный поток нефтеуглеводородов в случае осаждения загрязнения на дно.

Аналогично на верхней границе ($z = 0$) задается условие непротекания в общем случае или мгновенный поток нефтеуглеводородов в случае образования вторичного загрязнения поверхности воды.

Принимается, что пятна вторичного загрязнения выходят на поверхность воды со своей плотностью и вязкостью. После этого пятна вторичного загрязнения переносятся в пространстве аналогично спиллетам первичного загрязнения, подвергаясь воздействию ветровых волн (верти-

кальная дисперсия). В случае выноса пятен в зону с меньшей плотностью воды, вторичное загрязнение повторно тонет. При наличии ледяного покрова появляется вероятность выхода пятен вторичного загрязнения под лёд, поэтому генерируется случайное число $P = [0, 1]$ и при $P \leq C_{ice}$ считается, что вторичное загрязнение вышло под лед.

Для численного решения уравнения используется хорошо известная схема коррекции потоков FCT (flux-corrected transport), которая обладает наилучшими свойствами транспортности без искусственной численной вязкости. Для расчёта коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии используется схема Смагоринского. Для расчёта коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии используется схема KPP (K-profile parameterization). При расчётах учитывается наличие на верхней границе расчетной области дрейфующего льда или припая.

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы.

Финский залив около половины года покрыт ледяным покровом. Помимо влияния сплоченности и дрейфа льда на распространение нефтяного загрязнения на поверхности воды, загрязнение самого ледяного покрова может произойти в результате сброса нефти непосредственно на верхнюю поверхность снежно-ледяного покрова или под лед. Используемый в модели подход позволяет также учитывать загрязнение ледяного покрова при сжатии ледяных полей, в результате чего часть нефти оказывается на верхней поверхности льда («lead pumping») или уходит под лед.

Нефть, попавшая на верхнюю поверхность ледяного покрова, растекается по поверхности, продолжает испаряться, частично впитывается в снежно-ледяной покров и переносится дрейфующей загрязненной льдиной. Для расчётов процесса растекания нефти на верхней поверхности ледяного покрова и для расчёта глубины проникновения нефти в ледяной покров использовались полуэмпирические параметризации, полученные в результате лабораторных и экспериментальных исследований.

Нефть, попавшая под лед, растекается и скапливается в полостях и карманах на нижней поверхности ледяного покрова, часть нефти может заполнять трещины и разводя. При этом, процесс загрязнения льда зависит от шероховатости и топографии нижней поверхности. Чем больше впадин и углублений и чем они глубже, тем больше нефти может быть задержано льдом и тем меньше площадь растекания нефти. Для расчёта процесса растекания нефти подо льдом используется полуэмпирическое выражение, полученное для горизонтальной и относительно гладкой ниж-

ней поверхности льда, т.е. принимается, что горизонтальные размеры пятна нефти меньше расстояний между неровностями льда, ограничивающими растекание нефти. Как показали экспериментальные исследования, перемещение нефти относительно нижней поверхности льда начинается при достижении некоторой критической скорости течения воды относительно льда. При скорости течения меньше критической нефть перемещается вместе со льдом.

При моделировании переноса пятен нефтепродуктов предполагается, что координаты и размеры пятна известны (например, по спутниковой информации). Однако время, когда нефтяное загрязнение оказалось на морской поверхности, неизвестно. Физические и химические свойства нефти (или топлива) могут быть известны или неизвестны (наиболее вероятный случай). В модели рассматриваются оба случая, при этом рассчитываются адвекция, вертикальная дисперсия ветровыми волнами; влияние сплоченности и дрейфа льда. В случае, когда свойства нефти известны, дополнительно производится расчёт процессов испарения (последняя фракция) и образование эмульсии типа «вода в нефти» (максимальное значение), если данная нефть способна формировать эмульсию.

Нефтяные пятна на спутниковых снимках обычно имеют вытянутую форму, но могут принимать и достаточно причудливую форму в зависимости от особенностей динамики района. Для задания начальной формы пятна вводятся координаты оконтуривающих пятно реперных точек (не менее 3). Образующийся неправильный многоугольник равномерно и плотно заполняется частицами (трассерами) с известными или неизвестными свойствами.

В качестве иллюстрации приведены примеры расчётов распространения нефтяного загрязнения для различных прогностических гидрометеорологических ситуаций. В приведенных примерах задавались неподвижные модельные источники с постоянной скоростью поступления нефти на поверхность воды (30 тонн/час) в течение 4 – 5 суток. Физико-химические свойства нефтепродукта соответствуют свойствам сырой нефти REBCO (плотность 870 кг/м³; кинематическая вязкость 55.9 cSt; массовая доля асфальтенов, парафинов и смол 12%). На рис. 4.8 приведена расчётная сеточная область Финского залива и расположение точек, для которых далее приводятся результаты расчётов (осень). Здесь и далее на осях приведены сеточные координаты (шаг сетки $\Delta x = \Delta y = 1852 \text{ м} - 1 \text{ морская миля}$).

На рис. 4.9 приведён пример результатов оперативно-прогностического расчета распространения нефтяного загрязнения в точке 1. На каждой

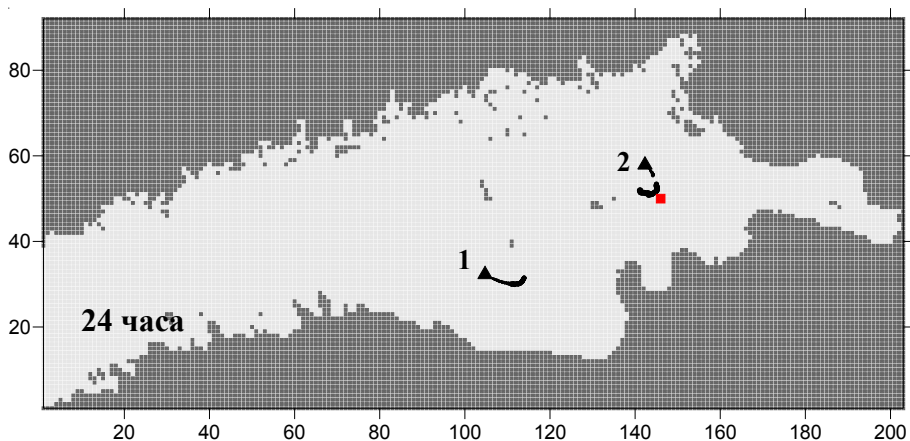


Рис. 4.8. Расчётная сеточная область Финского залива, расположение точек и результаты расчета распространения нефтяного загрязнения через 24 часа

картинке приведены положение «реального» разлива (черный цвет) и прогноз его распространения на сутки вперед (серый цвет).

На рисунке заметно некоторое несоответствие прогностического и «реального» положения пятна загрязнения. Так, прогноз положения пятна на срок 96 часов после начала разлива, данный сутки назад, дал вынос основной массы нефти к берегу и загрязнение обширной береговой черты. Расчёт «реального» разлива на срок 96 часов показал, что пятно нефти не дойдёт до берега и, соответственно, загрязнения береговой черты через 96 часов после начала разлива не произойдет.

Поскольку в период проведения расчётов скорость ветра составляла порядка 5 - 10 м/с, под действием ветровых волн происходил процесс вертикальной дисперсии нефти в воду и образование эмульсии «нефть в воде». На рис. 4.10 приведено распределение концентрации нефтяного загрязнения (мг/м^3) на горизонте 3 м. Хорошо видна многоядерная структура внутриводного загрязнения. По результатам расчётов с глубиной концентрация нефтяного загрязнения убывает довольно быстро и на горизонте 5 м достигает минимальных значений.

Точка 2 была расположена в восточной мелководной части залива. Сильный ветер в совокупности с пространственно неоднородным полем течения на поверхности воды привели к разрыву пятна загрязнения (рис. 4.10) и образованию эмульсии «нефть в воде» в верхнем слое моря.

Особенности пространственной неоднородности плотностной структуры воды обусловили образование вторичного загрязнения на поверхности

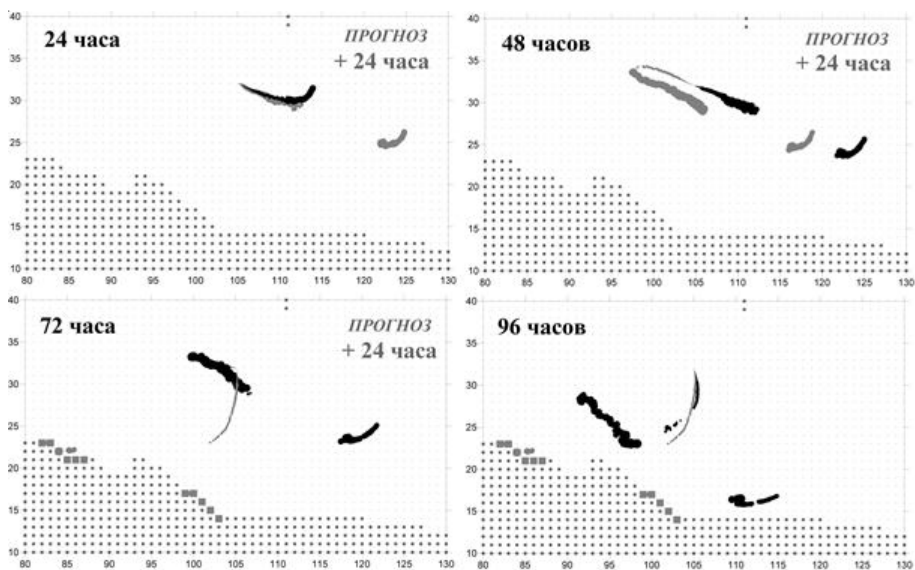


Рис. 4.9. Пример результатов оперативно-прогностического расчета распространения нефтяного загрязнения в точке 1.
«Реальный» разлив (диагноз) - черный цвет; прогноз - серый цвет

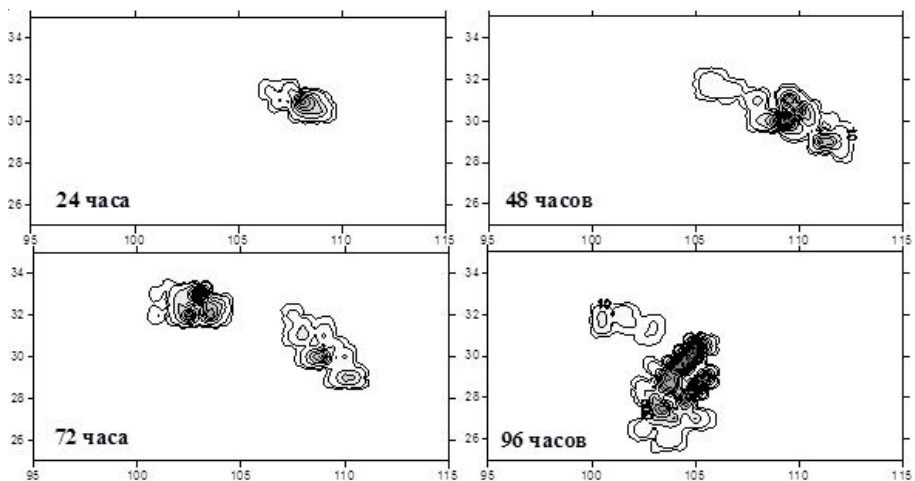


Рис. 4.10. Распределение концентрации нефтяного загрязнения (mg/m^3) на горизонте 3 м при выносе внутриводного загрязнения в область с большей плотностью воды (рис. 4.11).

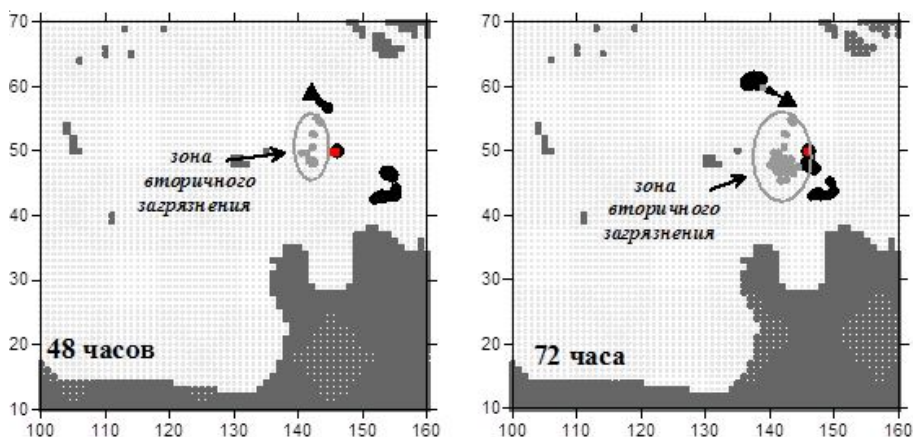


Рисунок 4.11. Пример результатов расчета распространения нефтяного загрязнения в точке 2. Загрязнение на поверхности воды - черный цвет; вторичное загрязнение - серый цвет

Тестовые расчёты распространения нефтяного загрязнения в зимний период (январь 2011 г.) проводились для модельных источников, расположенных в восточной и центральной частях залива. В случае размещения источника аварийного разлива нефти в восточной части залива при сплошности льда 8 - 9 баллов, пятно нефти занимало весьма ограниченную площадь, ширина разлива составляла всего 100 - 200 м, толщина нефти увеличилась до 5 - 10 мм. Протекание процесса испарения при высокой сплошности льда замедляется, а образование эмульсий «нефть в воде» и «вода в нефти» не происходит. В результате, такой разлив способен существовать долгое время до сжатия (разрежения) ледяного покрова или до его таяния.

Модельный источник в центральной части залива располагался в точке, где сплошность льда за четыре дня увеличилась с 4 до 8 баллов (рис. 4.12). Увеличение сплошности льда оказывает существенное влияние на траекторию распространения загрязнения, а неоднородность поля скорости дрейфа льда приводит к разрыву пятна. Как показали результаты расчётов, скорость дрейфа льда местами оказалась больше собственной скорости спиллетов, что привело к переносу части пятна вместе с дрейфующим льдом. При этом произошло ограничение площади оставшейся части пятна в районе расположения источника загрязнения.

Проведённые тестовые испытания показали, что модель OilMARS может быть использована для прогноза переноса и трансформации нефтяных

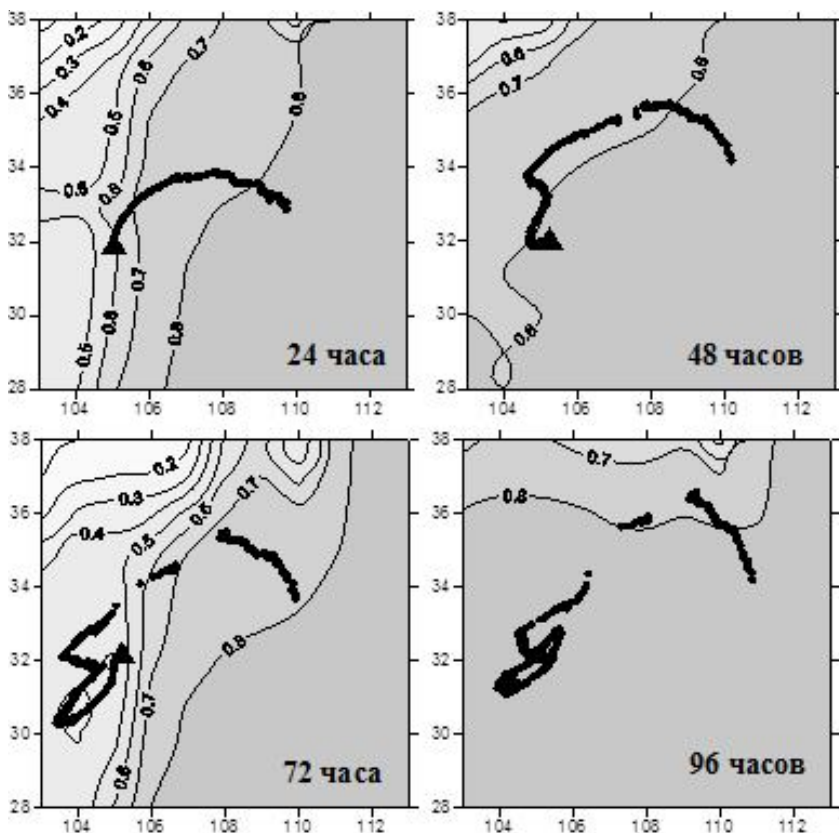


Рис. 4.12. Пример результатов расчёта распространения нефтяного загрязнения зимой в точке, расположенной в центральной части Финского залива. Изолинии представляют сплоченность льда (в долях единицы)

загрязнений в качестве модуля в оперативной океанографической системе прогноза GULFOOS. Качество прогноза распространения нефтяных загрязнений во многом определяются точностью прогнозов гидрофизических характеристик и ледовых условий в Финском заливе. Для проверки качества расчётов необходимо провести верификацию модели OilMARS. В случае аварийных разливов нефти на поверхности воды могут быть зафиксированы положение и форма пятна нефти по результатам аэрофотосъёмки или по спутниковым снимкам. Концентрация нефтеуглеводородов в толще воды может быть определена при проведении специальных измерений в районе аварии. Такие же параметры могут быть зафиксированы и при распространении пятен нефтепродуктов при судовых

разливах. Непременным условием для верификации является отслеживание во времени положения и формы пятен, т.е. проведение регулярного спутникового мониторинга акватории. Опыт использования спутниковой информации показал, что, получая данные о положении и площади пятна и данные для корректировки расчетов, модель может дать информацию о возможных пропущенных при анализе снимка пятнах, при прогностических расчётах модель может помочь определить положение пятен на последующих снимках. Кроме того, модельные расчёты позволяют идентифицировать обнаруженное пятно как новое или как повторное обнаружение пятна с предыдущего снимка.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Усвоение спутниковой температуры поверхности моря (ТПМ) с использованием трёхмерной вариационной и ассимиляционной схемы в оперативную модель Финского залива

Задачи работы:

Используя веб-сайт SATIN (<http://satin.rshu.ru/>) найти требуемую для последующей ассимиляции ежесуточную ТПМ с пространственным разрешением $\sim 1 \times 1$ км на заданную дату (определяется вариантом лабораторной работы).

Построить графики пространственного распределения спутниковой ТПМ для рассматриваемого региона (Финского залива) и произвести сравнение с модельными результатами.

Выполнить процедуру ассимиляции спутниковой ТПМ на основе трёхмерной вариационной ассимиляционной схемы, используя предлагаемое программное обеспечение.

Исследовать чувствительность полученных результатов к варьированию числа ЭОФ и заданию радиуса корреляции, определяющего оператор горизонтальной ковариации.

Проанализировать полученные результаты, особое внимание уделить чувствительности результатов к количеству ЭОФ и радиусу корреляции.

Исходные данные:

Поля температуры, солёности и уровня моря, полученные в результате численных расчётов по трёхмерной модели NEMO для Финского залива за определённую дату.

Набор ЭОФ, соответствующий данному модельному решению.

Технические требования:

Операционная система UNIX.

Интерактивная среда FERRET.

Порядок выполнения работы:

Используем веб-сайт SATIN (<http://satin.rshu.ru/>), предназначенный для поиска и предварительной визуализации данных дистанционного зондирования океана.

Заходим в «каталог данных», выбираем продукт «Температура морской поверхности GHR SST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis» – это ежесуточная ТПМ с пространственным разрешением $\sim 1 \times 1$ км, полученная с помощью оптимальной интерполяции данных с нескольких спутников.

Скачиваем данные ТПМ по протоколу FTP за необходимую дату (вариант лабораторной работы):

- копируем в буфер обмена ссылку на файл с расширением *.bz2 (данные сгруппированы в папках по годам и порядковым номерам дней года);

- заходим в рабочую директорию;

- в командной строке набираем: wget «ссылка на файл»

```
wget ftp://ftp.solab.rshu.ru/data/allData/JPL-L4UHfnd-GLOB-MUR/2011/140/20110520-JPL-L4UHfnd-GLOB-v01-fv03-MUR.nc.bz2
```

- разархивируем файл: bzip2 -d «имя файла»:

```
bzip2 -d 20110520-JPL-L4UHfnd-GLOB-v01-fv03-MUR.nc.bz2
```

Для дальнейшей работы с файлом используем интерактивную среду FERRET.

В командной строке набираем:

```
ferret -gif
```

Просматриваем файл:

```
yes? use 20110520-JPL-L4UHfnd-GLOB-v01-fv03-MUR.nc
```

```
yes? show data
```

```
currently SET data sets:
```

```
1> ./ 20110520-JPL-L4UHfnd-GLOB-v01-fv03-MUR.nc (default)
```

name	title	I	J	K	L
ANALYSED_SST	analysed sea surface temperatur	1:32768	1:16384	...	1:1
ANALYSIS_ERROR	estimated error standard deviat	1:32768	1:16384	...	1:1
MASK	sea/land field composite mask	1:32768	1:16384	...	1:1
SEA_ICE_FRACTION	sea ice area fraction	1:32768	1:16384	...	1:1

Файл содержит требуемые ТПМ (ANALYSED_SST) и ошибку данных наблюдений (ANALYSIS_ERROR) на глобальной сетке.

Вырежем район Финского залива и выполним визуализацию данных:

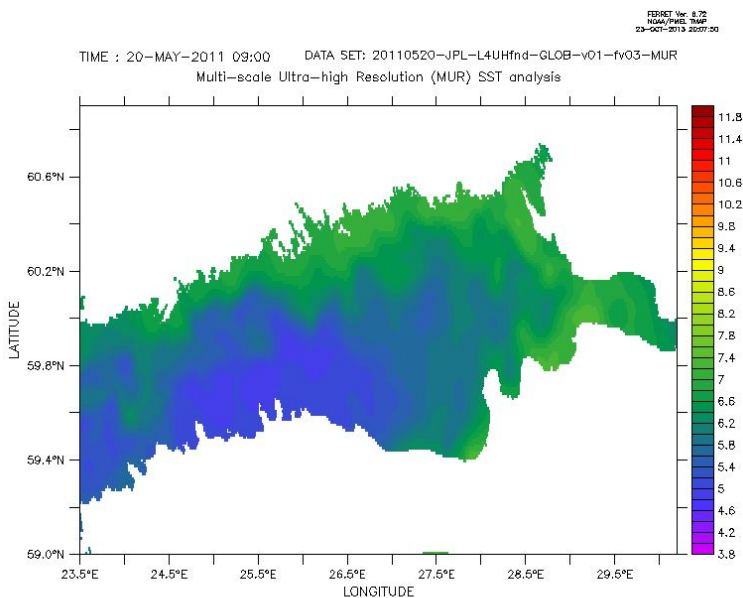
```
yes? shade/x=23.5:30.2/y=59.0:60.9 ANALYSED_SST
```

```
yes? frame/file=sst.gif
```

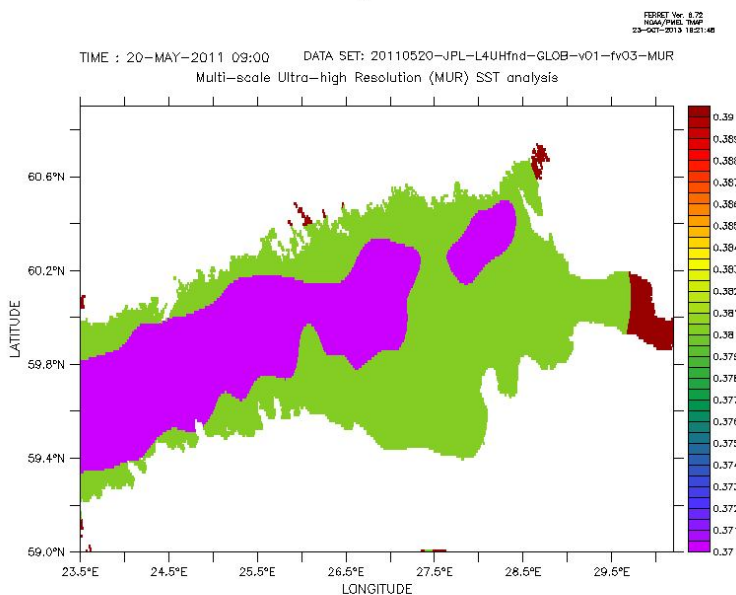
```
yes? shade/x=23.5:30.2/y=59.0:60.9 ANALYSIS_ERROR
```

```
yes? frame/file=sst_error.gif
```

Построим пространственное распределение фонового значения ТПМ (модельное решение).



ANALYSED_SST-273.15



estimated error standard deviation of analysed_sst (kelvin)

Рисунок 1. Пространственное распределение спутниковой ТПИМ и ошибок ТПИМ

Просматриваем файл, содержащий модельное решение на требуемую дату:

```
yes? use 2013140-model.nc
```

```
yes? show data
```

```
currently SET data sets:
```

```
1> ./ 2013140-model.nc (default)
```

name	title	I	J	K	L
NAV_LON	Longitude	1:203	1:89	...	...
NAV_LAT	Latitude	1:203	1:89	...	...
SSH	sea surface height	1:203	1:89	...	1:1
TEM	temperature	1:203	1:89	1:94	1:1
SAL	salinity	1:203	1:89	1:94	1:1

Файл содержит модельные поля температуры (TEM), солёности (SAL) и уровня моря (SSH) на модельной сетке, определённой переменными NAV_LON и NAV_LAT.

Выполним визуализацию данных (поверхностную температуру воды):

```
yes? shade/k=1/levels=(3.8,12,0.2) TEM
```

```
yes? frame/file=modelsst.gif
```

Выполняем преобразование ТПМ и ошибок данных наблюдений с глобальной сетки на вычислительную сетку модельной области, используя script gridSST в программе FERRET.

В командной строке набираем: «ferret -script gridSST «имя входного файла» «имя выходного файла»».

Работа с программой 3DVAR ассимиляции данных наблюдений.

Открыть файл параметров настройки ассимиляционной процедуры 3dvar.conf, в котором можно изменять следующие параметры:

- количество ЭОФ (Neof)
- радиус корреляции оператора горизонтальной ковариации (Rcor).

В командной строке набирать: «script 3DVARSSST». В результате работы ассимиляционной процедуры в рабочем каталоге появятся следующие файлы:

- inctem.nc – приращения в поле поверхностной температуры моря;
- analtem.nc – поверхностная температура моря после проведения процедуры ассимиляции.

Визуализируйте полученные файлы аналогично файлу, содержащему исходную модельную температуру моря.

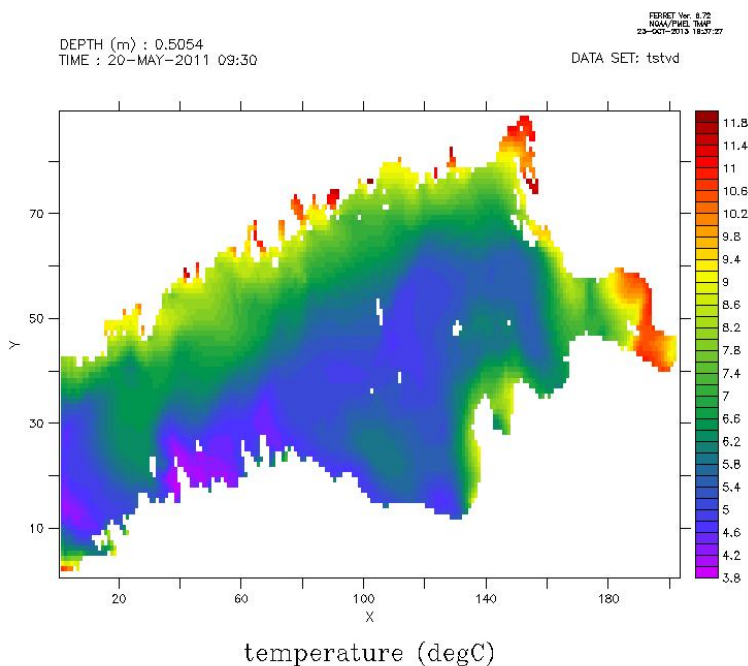


Рисунок 2. Пространственное распределение модельной ТПМ

Повторите процедуру ассимиляции, меняя параметры настройки, тем самым исследуйте чувствительность ассимиляционной процедуры к количеству ЭОФ и радиусу корреляции.

Проанализируйте полученные результаты.

ТЕМЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Структура оперативной океанографической системы Балтийского моря
2. Региональная объединенная оперативная океанографическая система Черного моря
3. Средиземноморская оперативная океанографическая система
4. Оперативная океанографическая система морей европейских Северо-западных шельфовых морей
5. Ирландская-Бискайская-Иберийская региональная оперативная океанографическая система
6. Прибрежная океанская система наблюдений и прогноза Кипра
7. Единая система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)
8. Каталог продукции мониторинга и прогноза океана проекта MyOcean

ОБЯЗАТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. З.К. Абузьяров, И.О. Думанская, Е.С. Нестеров Оперативное океанографическое обслуживание. Москва; Обнинск: Изд. «ИГ-СОЦИН», 2009, 288 с.
2. Schiller A., Brassington G.B. et al. Operational Oceanography in the 21st Century.– Springer, 2011.– 450 pp
3. Building the European Capacity in Operational Oceanography: Proceedings of the third international Conference on EuroGOOS (Athens, Greece, 3 – 6 December 2002) – Amsterdam: Elsevier B.V., 2003. – 698 p. – (Elsevier Oceanography Series, 69)
4. European Operational Oceanography: Present and Future: Proceedings of the Thouth international Conference on EuroGOOS (Brest, France, 6 – 9 June 2005) – Norrköping, Sweeden: EuroGOOS Office SVHI, 2006. – 856 p.
5. Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Science and Technology Bulletin. 1999. 5. No 1. P. 3-16.
6. Reed M. The physical fates component of the natural resource damage assessment model system // Oil and Chemical Pollution. 1989. 5. P. 99-123.
7. Овсиенко С.Н. и др. Моделирование разливов нефти оценка риска воздействия на окружающую среду. // Тр. ГОИН. – 2005. – Вып. 209. – С. 248 – 271.
8. Становой В.В., Лавренев И.В., Неелов И.А. Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях. Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, вып. 77, с. 7-16.
9. Neelov I.A. et al. A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with a 3-D model. // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology. Ecology. – 2003. – Vol. 52, N 3. – P.346 – 359.
10. Preventive Methods for Coastal Protection, 2013. Springer, pp. 421
11. Daley R. Atmospheric Data Analysis. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press. 1991, 457 p.
12. Wunsch C. The Ocean Circulation Inverse Problem. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
13. Карлин Л.Н., Рябченко В.А., Ванкевич Р.Е., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Неелов И.А. Испытание оперативной океанографической системы при прогнозе гидродинамических характеристик в Финском заливе Балтийского моря. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2010, № 3(9), с. 39-48.

14. Stanovoy VV, Eremina TR, Isaev AV, Neelov IA, Vankevich RV, Ryabchenko VA, Modeling of Oil Spills in Ice Conditions in the Gulf of Finland on the Basis of an Operative Forecasting System//Oceanology, 2012, Vol. 52, No. 6, pp. 754–759.

15. Рябченко В.А. и др. Прогноз погоды и состояния водных объектов Северо-Западного региона России на базе комплекса гидродинамических моделей. – СПб.: Нестор-История, 2008. – 60 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Soomere T. et al. The progress in knowledge of physical oceanography of the Gulf of Finland: a review for 1997 – 2007. – *Oceanologia*. – 2008. – V. 50, N 3. – P. 287 – 362.

Preventive Methods for Coastal Protection /Ed. T.Soomere, Ewald Quak. - Springer Cham Heidelberg, 2013.-421 p.

Leppäranta M., Myrberg K. The Physical Oceanography of the Baltic Sea. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 378 p.

Roger Daley Atmospheric data analysis // Cambridge Atmospheric and Space Science Series – Cambridge: Cambridge University Press, 1991. – 457 p.

Bennett A.F. Inverse Methods in Physical Oceanography. – Cambridge: The University Press, 1992.

Bouttier F., Courtier P. Data assimilation concepts and methods / In: Meteorological Training Course Lecture Series ECMWF. 1999, 59 p.

Пененко В.В. Вариационное усвоение данных в реальном времени. // Вычислительные технологии, 2005, 10(8), 9-20.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОГРАФИЯ: ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ	7
1.1. Оперативная океанография – основные положения	7
1.2. Глобальные и региональные оперативные океанографические системы	9
1.3. Основные международные программы и проекты в оперативной океанографии	12
1.4. Наблюдательные системы в Мировом океане	16
1.5. Организация океанографического обслуживания в России	20
1.6. Единая система информации об обстановке в Мировом океане	22
ГЛАВА 2. ОПЕРАТИВНЫЕ ПРОГНОЗЫ СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ	25
2.1. Гидродинамический прогноз состояния океанов	25
2.1.1. Гидродинамические модели циркуляции океана и ледовых процессов	25
2.1.2. Модели ветрового волнения	33
2.1.3. Прогностические модели волн	35
2.1.4. Модели распространения нефтяных загрязнений	37
2.2. Усвоение данных наблюдений в численных моделях	42
ГЛАВА 3. АССИМИЛЯЦИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОГРАФИИ	43
3.1. Концепция проблемы ассимиляции (усвоения) данных наблюдений	43
3.2. Простые ассимиляционные схемы	47
3.3. Вероятностный подход к проблеме ассимиляции данных наблюдений	49
3.4. Стохастические и вариационные подходы в ассимиляции данных наблюдений	51
3.4.1. Метод оптимальной интерполяции	54
3.4.2. Трёхмерная вариационная ассимиляция данных (3D-VAR)	56

3.4.3. Моделирование ковариационной матрицы ошибок фонового состояния	58
3.4.4. Четырёхмерная вариационная ассимиляция данных (4D-VAR)5	9
3.4.5. Фильтр Калмана	61
 ГЛАВА 4. ОПЕРАТИВНЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ФИНСКОГО ЗАЛИВА	64
4.1. Структура оперативной прогностической системы GULFOOS	65
4.2. Результаты прогностических расчетов	68
4.3. Оперативный прогноз распространения и трансформации нефтяного загрязнения в Финском заливе	74
 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА	89
ТЕМЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ	94
ОБЯЗАТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	95
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	97

Учебное издание

***Татьяна Рэмовна Ерёмина
Екатерина Владимировна СОФЬИНА
Инга ДАЙЛИДИЕНЕ***

ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОГРАФИЯ

Учебное пособие

Компьютерная вёрстка, дизайн
К.П. Ерёмин

ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 17.09.2014. Формат 60х90 1/16. Гарнитура “Таймс”

Печать цифровая. Усл. печ. л. 00,0. Тираж 300 экз. Заказ № 156

РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр. 98.

Отпечатано в ЦОП РГГМУ
