

Спутниковое информационное обеспечение для организации разведки и эксплуатации нефтегазовых месторождений в арктических морях

А. И. Алексанин ¹, доктор технических наук

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

А. А. Кубряков ², кандидат физико-математических наук

Морской гидрофизический институт (Севастополь)

В. А. Левин ³, академик

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

С. В. Станичный ⁴, кандидат физико-математических наук

Морской гидрофизический институт (Севастополь)

Работа посвящена проблемам диагностики приповерхностного слоя океана, ледового покрова и их динамики по данным спутникового дистанционного зондирования. Рассматриваются состояние дел и подходы к разработке технологий спутникового информационного обеспечения для разведки нефтегазовых месторождений на шельфе Арктики, расчета нагрузок на добывающие платформы, безопасной проводки судов и экологического контроля морской поверхности. Детально описываются новые технологии расчета дрейфа льда и скоростей течений, обеспечение ежедневного поступления такой информации для произвольной акватории, краткосрочный прогноз перемещения поверхностных вод. Излагаются проблемы расчета яркости моря по данным сканеров цветности, используемых при организации экологического контроля морской поверхности, и возможные пути их решения. Создаваемые технологии в форме программных комплексов развертываются в Спутниковом центре Дальневосточного отделения РАН для ежедневного информационного обеспечения потребителей. Рассматриваются проблемы такого обеспечения и подходы к их решению.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, скорость дрейфа льда, биооптические параметры воды, спутниковое информационное обеспечение.

Введение

Хозяйственная деятельность в Арктике — это работы в экстремальных условиях. Регулярное получение информации о состоянии окружающей среды, о рисках, связанных с природными и антропогенными явлениями, об оценках и предсказаниях возможных последствий этих явлений — необходимое условие хозяйственной деятельности. Фактическое

отсутствие населения в этом районе, слабая измерительная база параметров окружающей среды, неизученность многих явлений и процессов делают получение такой информации особенно актуальным. Данные спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) приобретают ключевую роль для обеспечения хозяйственной деятельности. Современная спутниковая информация — это миллиарды одномоментных ежедневных измерений геофизических характеристик на огромных территориях. Для создания на основе этих измерений различных тематических карт уже сейчас требуются высокотехнологичные и часто дорогостоящие средства обработки

¹ e-mail: aleks@iacp.dvo.ru.

² e-mail: arskubr@ya.ru.

³ e-mail: levin@iacp.dvo.ru.

⁴ e-mail: sstanichny@mail.ru.

данных с конкретных спутников, а также средства комплексирования спутниковых данных и подспутниковых измерений. Основные направления работ в этой области связаны с построением карт необходимых геофизических параметров, повышением их точности и пространственного разрешения. Количество спутниковых приборов и их возможности постоянно растут, что приводит к постепенному замещению многих наземных измерительных систем спутниковыми. Различные хозяйствующие субъекты требуют конкретной и полной информации под свои задачи, часто в режиме реального времени. Технологии получения нужной совокупности параметров часто распределены по различным организациям. Поэтому также актуально создание информационных систем с прямым доступом к технологиям обработки данных.

Современные способы ДЗЗ базируются в основном на измерениях спутниками в трех спектральных диапазонах: инфракрасном (ИК), видимом и микроволновом. При этом используются два способа зондирования: пассивное (регистрация собственного излучения Земли или рассеянного солнечного излучения) и активное (получение отклика от посланного сигнала). Излучение, регистрируемое спутником, несет информацию о свойствах среды, через которую оно проходит [24]. Это позволяет создавать методы извлечения требуемых геофизических параметров. Излучение также часто приходит в форме последовательности изображений заданной местности. Географически привязанные и радиометрически выровненные изображения можно обработать методами анализа изображений и использовать для выделения объектов и явлений подстилающей поверхности и атмосферы над ней, а также для отслеживания и расчета трансформации объектов [19; 22; 27]. Большое значение имеет первичная обработка данных — географическая привязка и калибровка. Повышение точности калибровки позволяет получать высококачественные базовые продукты — величины прошедшего излучения для каждого спектрального канала с разделением на атмосферный вклад и вклад от поверхности. За счет качественной первичной обработки резко возрастают возможности использования данных ДЗЗ, что приводит к росту разнообразия тематических продуктов обработки. Растут число и возможности спутниковых датчиков. Комплексирование измерений разных датчиков приводит к появлению новых технологий и росту точности восстанавливаемых геофизических параметров.

Активное зондирование окружающей среды обычно дает наиболее качественные карты геофизических параметров по пространственному разрешению и точности. К такому способу относится ДЗЗ на основе локаторов и лидаров. Но этот способ имеет два существенных недостатка по сравнению с пассивными средствами зондирования. Во-первых, высокое пространственное разрешение

и значительные потребности в энергии не позволяют зондировать ежедневно всю поверхность Земли. Во-вторых, активные зондирующие обычно ограничены только одной заранее выбранной частотой спектрального диапазона. А чем больше спектральное разнообразие, тем больше геофизических параметров окружающей среды можно рассчитать. Уникальным и постоянно действующим источником электромагнитного излучения, покрывающим ежедневно всю Землю, является Солнце. Оно имеет довольно стабильные показатели излучения, и его в некотором смысле можно рассматривать как радар, работающий сразу во всех диапазонах спектра. Отраженный от поверхности сигнал, проявляющийся на изображениях в виде солнечного зайчика, занимающего значительные площади на изображениях пассивных зондирующих, несет массу информации. Так, в видимых каналах спектра в зоне солнечного зайчика можно проводить мониторинг следов судов, нефтяных slickов, внутренних волн и др., что в других областях изображения обнаружить невозможно. Странно, что анализу солнечного зайчика посвящено относительно мало работ. При обработке изображений со спутников солнечный зайчик обычно считается помехой, и его «вырезают». Нет специализированных спутниковых систем, нацеленных на мониторинг и анализ солнечного зайчика. В частности, для задачи информационного обеспечения работы Северного морского пути в условиях полярного дня такие системы были бы полезны.

Спутниковое информационное обеспечение разведки и эксплуатации нефтегазовых месторождений на шельфе Арктики зависит от задач, которые необходимо решать. К ним следует в первую очередь отнести расчет нагрузок на добывающие платформы и объекты промышленной инфраструктуры [7; 21], обеспечение безопасности проводки судов во льдах [20; 25], предотвращение чрезвычайных ситуаций и экологический контроль окружающей среды [6; 8]. Задачи эти взаимосвязаны, и их необходимо решать совместно. Задачи разбиваются на отдельные подзадачи, технологии решения которых находятся на разных уровнях готовности и качества при применении на практике. Подбор и адаптация соответствующих технологий друг к другу также является актуальной проблемой. Из всего разнообразия задач, связанных с добычей углеводородов, следует выделить как наиболее востребованные создание технологий детектирования свойств морского льда, технологий обеспечения безопасности ведения хозяйственной деятельности и экологического контроля окружающей среды, а также создание соответствующих мониторинговых информационных систем.

Мониторинг морского льда

Расчет физических характеристик льда и его динамики по данным спутникового дистанционного зондирования является основой информационного обеспечения деятельности в арктических морях. В последние

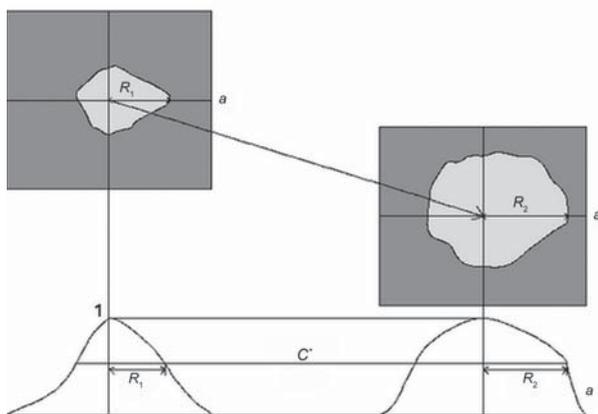


Рис. 1. Формы сечений автокорреляционных функций двух площадок и соответствующие вертикальные разрезы этих функций по линии «а». Светлые области – области, в которых величины автокорреляционных функций больше величины максимальной кросс-корреляции C

годы достигнуты значительные успехи в этой области [44]. Созданы технологии расчета сплоченности льда, его типа, толщины, возраста, температуры, технологии обнаружения торосов. Развита методика расчета дрейфа льда, сжатия, деформации. В то же время для полноценного информационного обеспечения задачи эксплуатации нефтегазовых месторождений на шельфе арктических морей и оптимальной проводки судов во льдах этого явно недостаточно. И автоматический расчет характеристик динамики льда является одной из ключевых проблем.

Новые методы расчета дрейфа льда. Спутниковые изображения льда можно использовать для расчета дрейфа льда. Подход на основе поиска максимальной кросс-корреляции (МКК) яркости прослеживаемой площадки на двух последовательных во времени изображениях в ИК или видимом диапазонах спектра [29] оказался удобным инструментом. Этим методом рассчитываются перемещение площадки и статистическая значимость кросс-корреляции, на основе которой идет отбраковка некорректных векторов скорости. Он позволяет строить карты дрейфа льда с довольно высокой точностью, но не отличается высокой надежностью, так как деформация изображений прослеживаемых площадок и шумы приводят к росту ошибочно построенных векторов. Это обусловлено тем, что высокая статистическая значимость кросс-корреляции не гарантирует высокую надежность расчета. В результате некорректно построенные вектора присутствуют в картах дрейфа и требуют дополнительной процедуры отбраковки. Значительной проблемой является расчет дрейфа в облачных условиях, когда информацию о положениях ледяных полей можно получить только по данным микроволновых измерений. Использование локационной съемки полностью решает проблему надежности и точности расчета

дрейфа, но не обеспечивает необходимую регулярность. Поступление информации о ледяных полях для произвольной выбранной акватории несколько раз в день обеспечивают микроволновые радиометры, такие как SSM/I, AMSR-E, AMSR2. Широко используются данные радиометров SSM/I спутников DMSP, технологии обработки которых созданы в конце 1990-х годов [36]. Современное состояние технологий обработки данных детально описано в [34]. Данные технологии с некоторыми улучшениями применяются до сих пор для обработки измерений с различных типов микроволновых радиометров [31]. Грубое пространственное разрешение изображений приводит к использованию большого размера площадок (с линейными размерами около 100 км). Из-за высоких требований к точности расчета дрейфа льда временные интервалы между используемыми изображениями также велики — обычно один-три дня. Большой размер площадок приводит к усреднению полей течений синоптического масштаба, на который приходится основная кинетическая энергия океана. Использование значительных временных интервалов приводит к усреднению скоростей дрейфа с характерными периодами колебаний менее суток. К таким колебаниям можно отнести приливные и инерциальные колебания, знание которых часто важно, например, при проводке судов во льдах.

Выбор размера площадки обусловлен несколькими причинами: размером пикселя радиометра, шумами использующихся спектральных каналов, надежностью алгоритма расчета перемещения и требуемой точностью расчета дрейфа. Появление радиометра AMSR-E и его улучшенного варианта AMSR2 дают возможность получать на регулярной основе более детальные изображения льда. Пиксель спектрального канала 89 ГГц изображения AMSR2 имеет линейный размер около 5 км, а у радиометра SSM/I — 12,5 км. К сожалению, имеются значительные шумы аддитивного типа с распределением, близким к нормальному, что не способствует снижению размера площадки [34]. Созданный в последние годы алгоритм расчета векторов перемещений [1] позволил существенно улучшить метод МКК. Отличительной чертой нового метода является новый критерий отбраковки некорректно построенных векторов.

Этот критерий представляет собой априорную оценку точности расчета скорости. Оценка базируется на естественном предположении, что точность зависит от свойств автокорреляционных функций площадок и величины полученной кросс-корреляции C : чем выше величина кросс-корреляции и чем резче убывают автокорреляционные функции при движении от центра площадок к их границам, тем выше точность расчета перемещения. Для полученной величины кросс-корреляции C делаются сечения автокорреляционных функций площадок на этом уровне. Для каждого шаблона ищется максимальное расстояние от центра площадки до точек

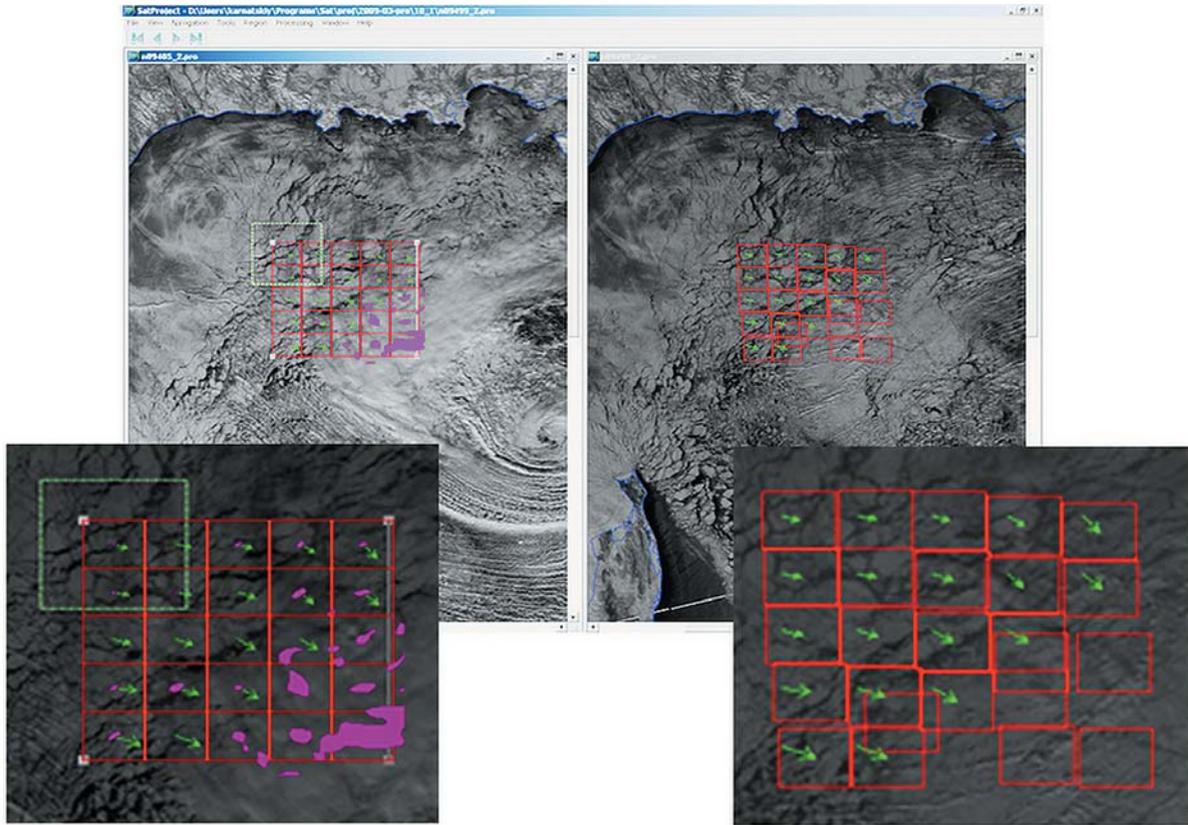


Рис. 2. Результаты работы критерия отбраковки на примере изображения Охотского моря за март 2009 г. в видимом канале NOAA-18/AVHRR (витки N89485–N89499). На первом изображении приведены вектора перемещений и их непересекающиеся площадки, для одной из которых обозначена область поиска. Для каждой площадки приведено сечение ее автокорреляционной функции. На втором изображении – образы площадок и их перемещения, прошедшие фильтрацию

изолинии сечения (R_1 и R_2). Схема расчета приведена на рис. 1.

Критерий априорной оценки точности имеет размерность скорости и рассчитывается по формуле

$$A_K = R^* / \Delta t,$$

где Δt — временной интервал между изображениями; $R^* = \max(R_1, R_2)$.

Отбраковка осуществляется по заданному порогу. Эксперименты показали, что величина априорной точности A_K обычно в два раза хуже, чем точность расчета, что можно использовать для контроля качества строящихся карт дрейфа льда.

На рис. 2 приведен пример построения перемещений льда, когда отбраковывались все перемещения при A_K больше 0,1 м/с. Как можно заметить, первое изображение в левом нижнем углу зоны построения скоростей содержит облачность, не позволяющую оценить перемещения. Соответствующие площадки имеют значительные по площади сечения автокорреляционной функции и отбраковываются. Оставшиеся перемещения сплошного ледяного поля имеют высокую когерентность и соответствуют перемещению такого поля под действием ветра. На участках изображения, искаженных облачностью,

вектора автоматически отбраковываются. Данный пример показывает, что использование предложенного критерия отбраковки может позволить отказаться от высокоточных процедур фильтрации облачности и радиометрической коррекции изображений, так как эти сопутствующие задачи часто не менее сложны, чем основная задача.

Применение критерия априорной точности расчета скорости перемещения маркеров по последовательности изображений и ряд приемов повышения точности и надежности расчетов позволяют решить проблему «выбросов» при автоматическом расчете скоростей поверхностных течений, присущих кросс-корреляционному методу, и отказаться от процедуры дополнительной фильтрации векторов. Для повышения надежности и точности расчетов был улучшен критерий схожести площадок (помимо кросс-корреляции используются еще два критерия) и применяется иерархия расчетов с использованием площадок разного размера. Метод прошел верификацию для построения карт дрейфа льда и карт скоростей поверхностных течений [2; 3]. При расчете дрейфа льда метод демонстрирует точность около 5 см/с, что соответствует наилучшей точности, получаемой современными методами. Высокая точность

и надежность алгоритма позволили применять его для расчета характеристик сжатия льда по последовательности изображений [5]. Получены первые результаты с расчетами зон сжатия льда, направлений сжатия и его величин.

Применение разработанного подхода к данным пассивных микроволновых зондировщиков AMSR позволило уменьшить геометрический размер прослеживаемых площадок и временной интервал между изображениями [4]. На рис. 3 приведен пример сравнения векторов, построенных по микроволновым данным, с эталонными векторами, построенными по данным видимого канала радиометра MODIS/AQUA. Для прослеживания использовались карты сплоченности льда, рассчитываемые алгоритмом ARTIST [45] по изображениям, получаемым на частоте 89 ГГц. Уже при размерах площадки 50×50 км² точность расчета скоростей дрейфа льда лежит в пределах 5 см/с. Высокая надежность расчета скоростей дрейфа льда позволяет использовать метод для коррекции результатов сплоченности льда. В силу частичной прозрачности облачности при зондировании на частоте 89 ГГц алгоритм позволяет выделять области, когда изображения были заперчены облачностью (в таких областях вектора дрейфа льда не строятся). Применение нового метода показывает, что из-за значительной пространственной изменчивости яркости льда скорости его дрейфа строятся в подавляющем числе случаев. Это позволяет получать ежедневные поля дрейфа без значительных пропусков.

Восстановление скоростей течений по спутниковым альтиметрическим измерениям. Определение скорости течений в арктических морях — одна из важнейших задач океанологии. Течения существенным образом влияют на перераспределение тепла, соли, биогенов в Северном Ледовитом океане, тем самым оказывая значительное влияние на экосистему бассейна

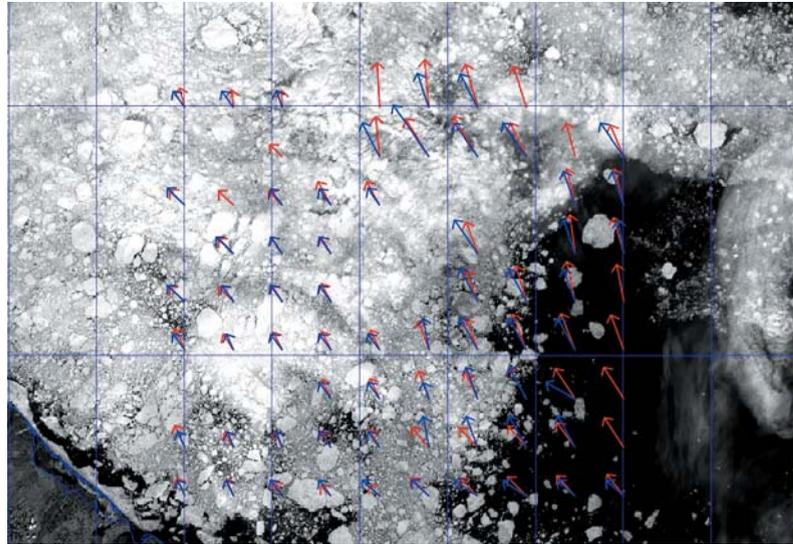


Рис. 3. Скорости дрейфа льда в Чукотском море в квадрате (68–70,5° с. ш., 170–179° з. д.) по данным радиометров MODIS (красный цвет) и AMSR-E (синий цвет) за 16 июля 2013 г. (суточный интервал между изображениями)

и на полярный климат. В последнее время благодаря развитию современных спутниковых альтиметрических измерений появилась возможность на регулярной основе восстанавливать скорости геострофических течений на открытых участках моря. Комбинированные измерения нескольких спутниковых альтиметров позволяют определять ежедневные карты аномалии уровневой поверхности океана с пространственным разрешением 0,25° [37].

Для определения полной динамической топографии по данным альтиметров необходимо к полям аномалий уровня прибавить специальную геофизическую коррекцию — среднюю динамическую топографию. По градиентам полной динамической топографии рассчитываются скорости геострофических течений:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial(H+h')}{\partial y}, \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial(H+h')}{\partial x},$$

где h' — поля аномалий уровня, полученные из архива AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com>); H — средняя динамическая топография из работы [41]; u_g, v_g — геострофические скорости; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса.

Пример полученных по измерениям альтиметров поля поверхностной скорости геострофических течений для Карского моря приведен на рис. 4а.

В поверхностных слоях океана кроме геострофических течений большой вклад в суммарную скорость дают также дрейфовые течения, возникающие под действием касательного напряжения трения ветра. Полные поверхностные течения можно с хорошим приближением представить как сумму геострофических и дрейфовых течений. Для определения дрейфовых течений используются различные параметризации (например, [39; 40]), преимущественно основанные на теории Экмана. Он показал, что скорость дрейфового течения может быть определена как примерно 3% скорости ветра с отклонением приблизительно на 45° вправо от направления ветра, что согласуется с оценками [11]. Для определения скорости ветра могут быть использованы как данные атмосферных реанализов, так как и показания спутниковых скатерометров. На рис. 4б представлен пример поля

скорости ветра по измерениям скатеррометра «QuicSKAT», на рис. 4в — рассчитанные полные скорости поверхностных течений.

Распространение речных вод. Одним из основных источников биогенов в океане является речной сток. Кроме того, пресные речные воды значительно увеличивают соленосную стратификацию, которая крайне важна для холодных арктических морей [10]. Более трети пресных вод поступает в Северный Ледовитый океан в Карском море вместе с водами рек Оби и Енисея [38]. Речные воды могут распространяться в океане различным образом в зависимости от скоростей ветра и геострофических течений.

Большое содержание биогенных элементов, взвеси, а также пониженные значения солености в речных плюмах позволяют эффективно наблюдать за их распространением из космоса. Измерения спутниковой солености стали доступны сравнительно недавно — с 2011 г. после запуска специально направленных для этой задачи спутников «Aquarius» и SMOS. На рис. 5 изображена карта спутниковой солености по данным спутника «Aquarius» для августа 2011 г. в Карском море. Область пониженной солености со значениями 20—27 psu (psu, practical salinity unit, — единица практической шкалы солености), соответствующая зоне речного плюма, отчетливо видна на этих картах. Данная зона хорошо совпадает с областью повышенного значения концентрации хлорофилла А, восстановленного по оптическим измерениям спутника MODIS (рис. 6). Черной линией на рис. 5 изображены контуры фронтальной зоны плюма в поле поверхностной солености (изолиния 24 psu), построенные по данным экспедиционных исследований в сентябре 2011 г. [9].

Диаграммы рассеяния между спутниковыми и контактными измерениями солености и между контактными измерениями солености и концентрацией спутникового хлорофилла, приведенные на рис. 6, также демонстрируют отчетливую связь между этими параметрами. Таким образом, анализ показывает, что измерения спутникового хлорофилла и спутниковой солености согласуются и позволяют успешно идентифицировать зоны речного плюма в Арктике. Следует отметить, что мгновенные контактные измерения и осредненные за месяц спутниковые измерения не согласованы по времени и пространству. Поэтому такая валидация имеет скорее качественный характер и показывает способность спутниковых

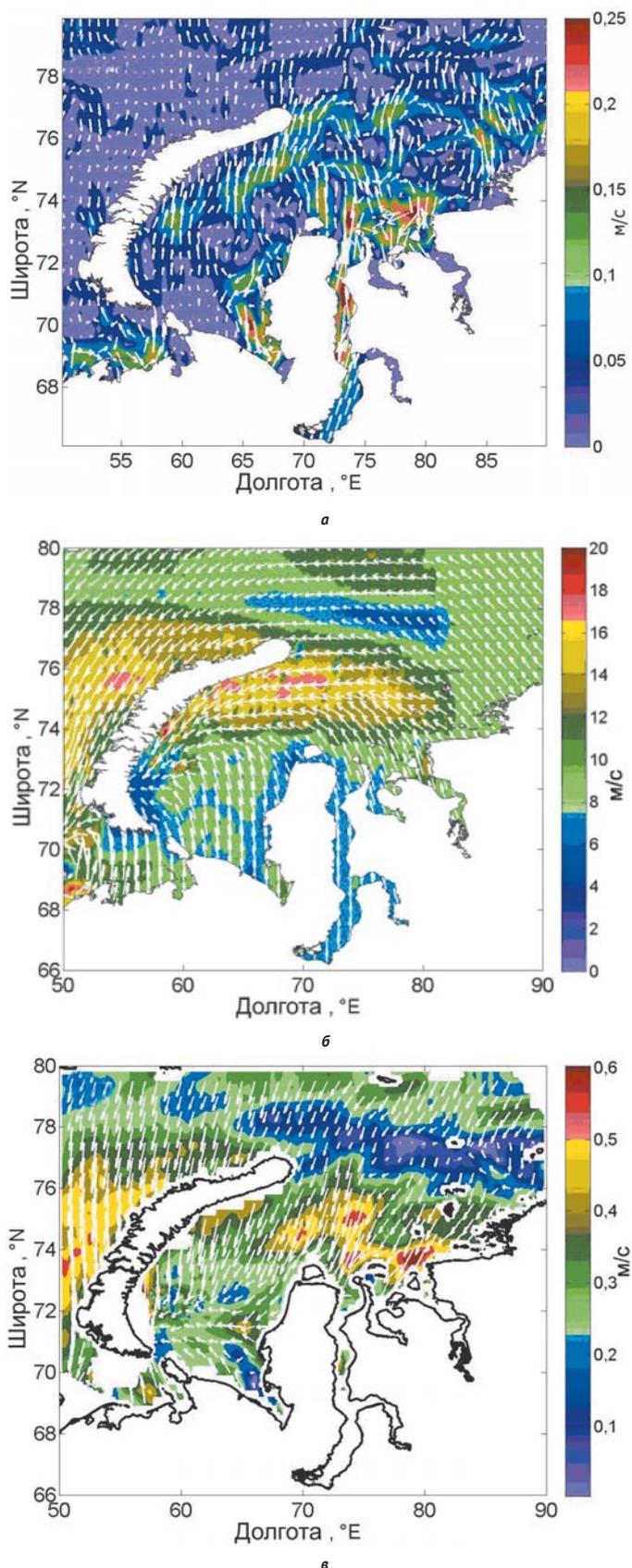


Рис. 4. Геострофическая скорость, полученная по данным альтиметров (а), ветер по измерениям скатеррометра «QuicSKAT» (б) и полная поверхностная скорость течений в Карском море (в) за 2 сентября 2008 г.

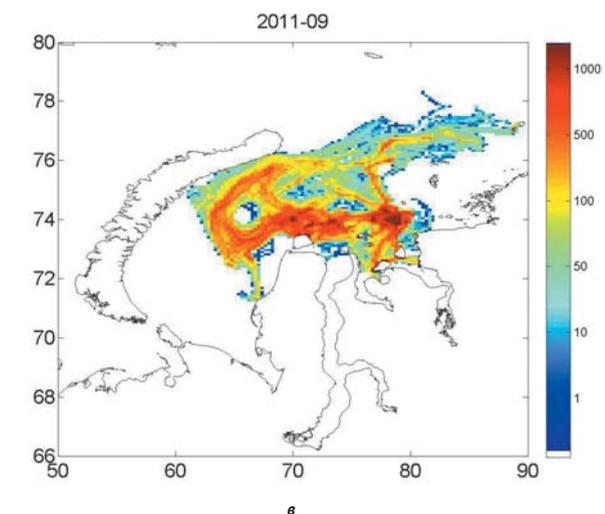
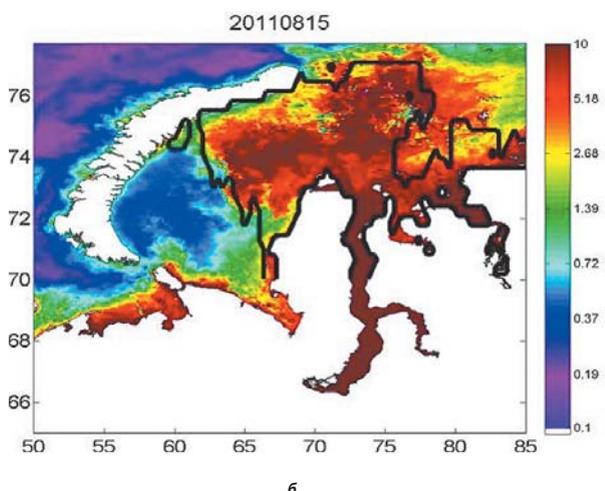
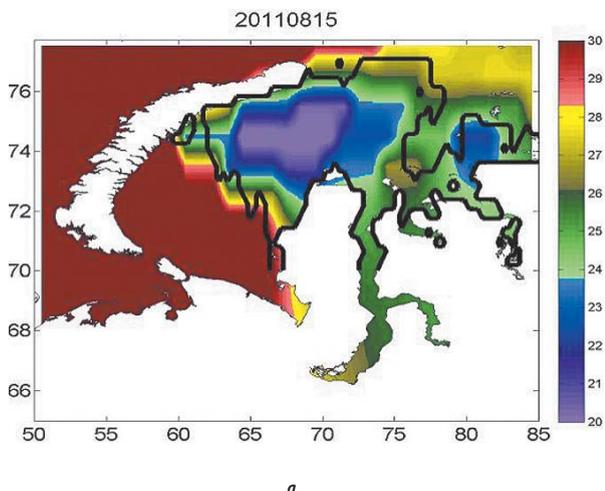


Рис. 5. Карты спутниковой солености (слева), спутникового хлорофилла (в центре) и концентраций виртуальных частиц за август 2011 г. с наложенными на них контурами фронтальной зоны в поле поверхностной солености, построенными по данным экспедиционных исследований в сентябре 2011 г.

данных идентифицировать зоны распространения пресных богатых биогенами речных вод. Коэффициент корреляции между измерениями спутниковой и контактной солености составляет 0,75, среднеквадратичное отклонение — примерно 2,3 psu, разница средних значений — примерно 1 psu. Эти статистические характеристики вполне приемлемы, если учесть несогласованность по времени и пространству, высокую изменчивость солености в зоне плюма и понижение чувствительности метода восстановления спутниковой солености с понижением температуры воды в приполярных районах [33]. Коэффициент корреляции между концентрацией хлорофилла и соленостью вдоль одного из разрезов, проходящих через границу фронтальной зоны, более высок (0,91) и отрицателен, поскольку низким значениям солености соответствуют высокие значения хлорофилла.

Распространение опресненного слоя речных вод обусловлено двумя основными факторами — геострофической циркуляцией и интегральным экмановским переносом [10]. Используя известные по измерениям альтиметров и скатермометров поля полных скоростей течений, можно рассчитать траектории распространения речных вод [11; 15]. Для этого в точках вблизи Обь-Енисейского взморья располагались постоянные источники лагранжевых частиц. Перемещение частиц рассчитывалось по схеме Эйлера. На рис. 5в изображены рассчитанные концентрации виртуальных частиц, определенные как количество всех частиц, прошедших через каждую ячейку карты (0,2×0,2°). Как видно, рассчитанный ареал речных вод хорошо совпадает как с контактными, так и со спутниковыми измерениями. Подобный метод был использован в [11] для исследования межгодовой изменчивости ареалов распространения речных вод и выявления основных механизмов, определяющих их распространение.

Краткосрочный прогноз перемещения водных масс в замерзающих морях имеет огромное значение. Данный подход, опробованный на примере распространения речного стока, можно использовать и для расчета дрейфа льда. Для этого требуется ежедневное построение скоростей дрейфа льда. Карты дрейфа льда по показаниям пассивных микроволновых радиометров обладают нужными свойствами. Объединение этих двух подходов позволяет решать данную актуальную задачу.

Обеспечение безопасности хозяйственной деятельности

Обеспечение безопасности хозяйственной деятельности связано с предотвращением чрезвычайных ситуаций и экологическим контролем окружающей среды. Технические сооружения и суда оснащены современными приборами контроля их состояния, обычно позволяющими оценивать риски наступления чрезвычайной ситуации. Эффективны спутниковые системы контроля утечек нефтепродуктов вблизи

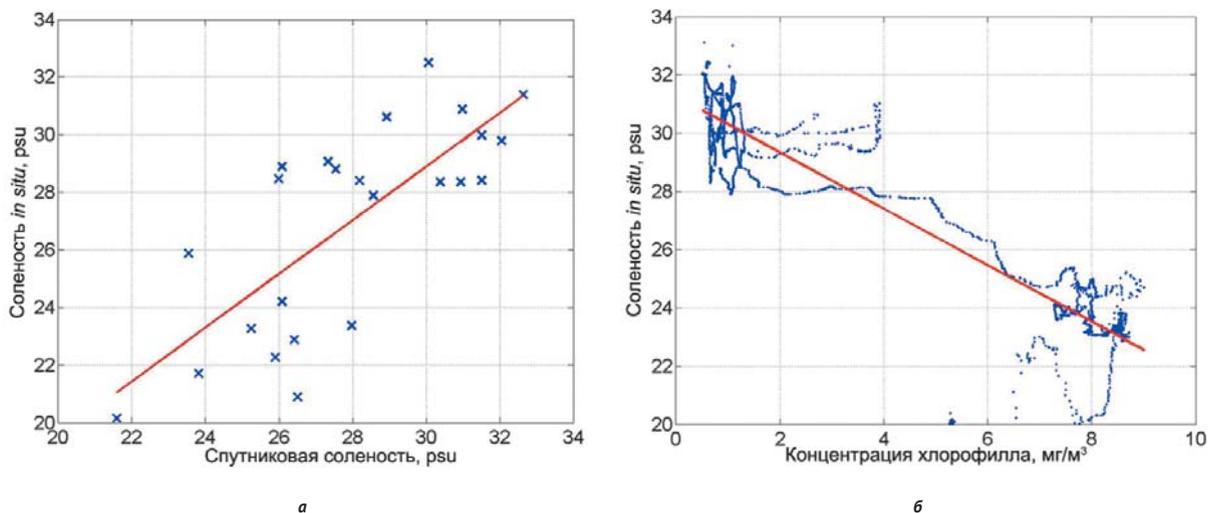


Рис. 6. Диаграммы рассеяния между среднемесячными спутниковыми и контактными измерениями солености (а) и концентрацией спутникового хлорофилла и контактными измерениями солености (б)

добывающих платформ, основанные на обработке изображений локаторов с синтезированной апертурой (ЛСА) [13]. Однако при транспортировке углеводородов (судами и нефтегазопроводами) утечки нефтепродуктов возможны в произвольном месте путей транспортировки. В этом случае изображения ЛСА в силу незначительного пространственного покрытия не могут служить оперативным средством контроля утечек. Спутниковые изображения в ИК и видимом спектральных диапазонах, имеющие достаточно высокое пространственное разрешение, могут служить альтернативой изображениям ЛСА.

Поиск разливов нефтепродуктов на ИК изображениях возможен благодаря их значительному прогреву при солнечном освещении. Рост пространственного разрешения современных зондировщиков повышает вероятность обнаружения разливов. Более эффективным средством обнаружения являются изображения в видимом спектральном диапазоне. Тут возможны два механизма: обнаружение slickов, обусловленных «выглаживанием» волнения морской поверхности нефтяной пленкой и приводящих к изменению характеристик рассеяния взволнованной поверхности, а также обнаружение изменений спектров яркости моря. И если первый вариант обнаружения существенно зависит от близости солнечного зайчика, то второй работает в произвольном регионе в дневное время и обусловлен различиями спектров поглощения и диффузного рассеяния природных взвесей (в первую очередь фитопланктона) и нефтяной пленки в море. Вторым случаем предполагает наличие точных методов расчета биопараметров моря. Ключевым параметром является концентрация основного пигмента фитопланктона — хлорофилла А.

Расчет биопараметров моря по данным спутникового дистанционного зондирования Земли в видимом спектральном диапазоне является основой для

мониторинга экологического состояния акваторий. Наиболее проблемные районы — территории с высокими концентрациями фитопланктона и наличием примесей как природного, так и антропогенного происхождения. Рекомендуемый алгоритм расчета концентрации хлорофилла А OC3, реализованный в программном комплексе «SeaDAS» [28] и использующий рекомендуемый алгоритм атмосферной коррекции (NIR-коррекции), может давать значения концентрации хлорофилла А, многократно превышающие реальные значения [14]. Известно также, что в северных широтах из-за низких углов солнца над горизонтом ошибки расчета биопараметров также велики. Анализ причин возникновения таких ошибок является актуальной задачей.

Основной проблемой создания высокоточных методов расчета биопараметров моря является необходимость разделения регистрируемого спутником излучения на восходящее из воды излучение и излучение атмосферы, достигающее 90% регистрируемой величины. Рекомендуемый алгоритм атмосферной коррекции базируется на предположении об отсутствии восходящего из воды излучения в ближней инфракрасной области спектра (для радиометра MODIS это спектральные каналы с характерными длинами волн 748 и 869 нм). Предположение позволяет считать регистрируемое в этих каналах излучение только излучением атмосферы и рассчитывать поправки, обусловленные влиянием атмосферы, для всех спектральных каналов при определении восходящего из воды излучения. В мутных водах это предположение не выполняется. В последние годы широкое применение получила MUMM-коррекция влияния атмосферы [42; 43], которая позволяет получать более точные результаты в зонах с высоким содержанием примесей, исходя из установленного факта стабильности формы спектра восходящего из воды излучения в ближней инфракрасной

облачности. В частности, для радиометра MODIS используется величина отношения яркостей восходящего излучения упомянутых спектральных каналов. Однако точность такой коррекции для относительно чистых вод хуже, чем у NIR-коррекции. Наблюдается нестабильность результатов сравнений спутниковых оценок коэффициентов яркости океана с измерениями. Так, применение метода атмосферной коррекции MUMM приводило к переоценке коэффициентов яркости океана согласно [42], близости средних рассогласований измерений согласно [30], занижению измерений на величину около 20% согласно [32] и занижению измерений на величину около 40% согласно [35]. При этом наблюдалась значительная ошибка случайного характера. То есть результат зависел от выборки.

Основными параметрами, на которых базируются спутниковые биооптические алгоритмы, являются значения яркости моря в форме коэффициентов отражения света над поверхностью воды, применяемые при дистанционном зондировании:

$$Rrs(\lambda) = \frac{nLw(\lambda)}{Es(\lambda)},$$

где $nLw(\lambda)$ — нормализованное восходящее из воды излучение в единице телесного угла; $Es(\lambda)$ — освещенность поверхности океана; λ — центральная длина волны спектрального канала.

Для анализа неточностей спутниковых расчетов Rrs были построены графики зависимостей ошибки расчета от самой величины Rrs , получаемые по одному изображению [12]. Для этого использовались суточные измерения в областях, где концентрация биооптических компонентов в воде менялась значительно. На рис. 7 приведены относительные ошибки измерений, полученных в течение дня при безоблачной погоде в разных точках акватории и характеризующих превышение одной величины над другой. Как правило, в течение дня атмосфера на таких расстояниях была однородной. Рассогласования оптических толщин атмосферного аэрозоля в точках измерений были меньше 10% за исключением одного дня — 31 августа 2009 г. (учет оптических характеристик аэрозоля оказывает ключевое влияние на точность расчета биопараметров). Величина ошибки δ бралась в форме отношения спутниковой оценки к прямому измерению за минуту. В противном случае использовалась обратная величина, и ей присваивался отрицательный знак. Зависимость ошибок от рассогласования измерений во времени была слабо выражена и не объясняла полученные результаты. Можно отметить, что ошибки измерения за один день хорошо соответствуют гладкой кривой. Аппроксимация ошибок полиномом второй степени для MUMM-коррекции и линейная аппроксимация для NIR-коррекции показали, что стандартное отклонение относительной ошибки от кривых было меньше величины 0,2.

Несмотря на то что измерения за день брались в разных частях морской акватории при разном ветре, разных углах солнца, разном компонентном составе примесей воды и для разных типов вод, ошибки измерения за один день носят систематический характер и хорошо аппроксимируются гладкой кривой. Ошибки разных спектральных каналов имеют близкие зависимости и лишь небольшие смещения друг относительно друга, что говорит о мультипликативном характере ошибок. При близких значениях мутности вод выявленные зависимости часто близки по форме, но имеют значительные рассогласования по средней величине ошибки. Ошибки велики даже в тех случаях, когда оптическая толщина аэрозоля определяется с высокой точностью. Характеристики ошибок позволяют предположить, что они обусловлены не выбором типа атмосферной коррекции, а используемой моделью прохождения излучения через атмосферу. Построение такой модели должно быть основным направлением работ в области совершенствования расчета базовых оптических характеристик приповерхностного слоя моря.

Заключение

Ведение хозяйственной деятельности в Арктике требует развитых средств ежедневного информирования о состоянии океана и атмосферы. В малонаселенном регионе регулярное получение такой информации возможно лишь на основе спутникового дистанционного зондирования. Создание современных технологий извлечения необходимых физических характеристик окружающей среды из спутниковой информации для расчета нагрузок на добывающие платформы, безопасной проводки судов и экологического контроля морской поверхности связано с развитием фундаментальных основ ДЗЗ. Но как бы ни были значительны результаты фундаментальных исследований, только опробование их на практических задачах в форме постоянно работающих и модернизирующихся технологий позволяет надеяться на успешное решение упомянутых проблем. По этой причине создаваемые технологии внедряются в форме программных комплексов в Спутниковом центре Дальневосточного отделения РАН, расположенном во Владивостоке [26]. Спутниковый центр — это современный четырехантенный комплекс приема, обработки, архивирования и поставки потребителям требуемой информации в режиме реального времени.

Одной из задач Спутникового центра является создание новых технологий ДЗЗ и организация информационного обеспечения потребителей Северо-Восточного региона страны. Для этого уже сейчас Спутниковый центр накопил технологии и проводит следующие работы:

- оперативную поставку изображений ледяных полей с разделением льда и облачности для выбора оптимального пути проведения ледоколом каравана судов;
- расчет кромки льда;

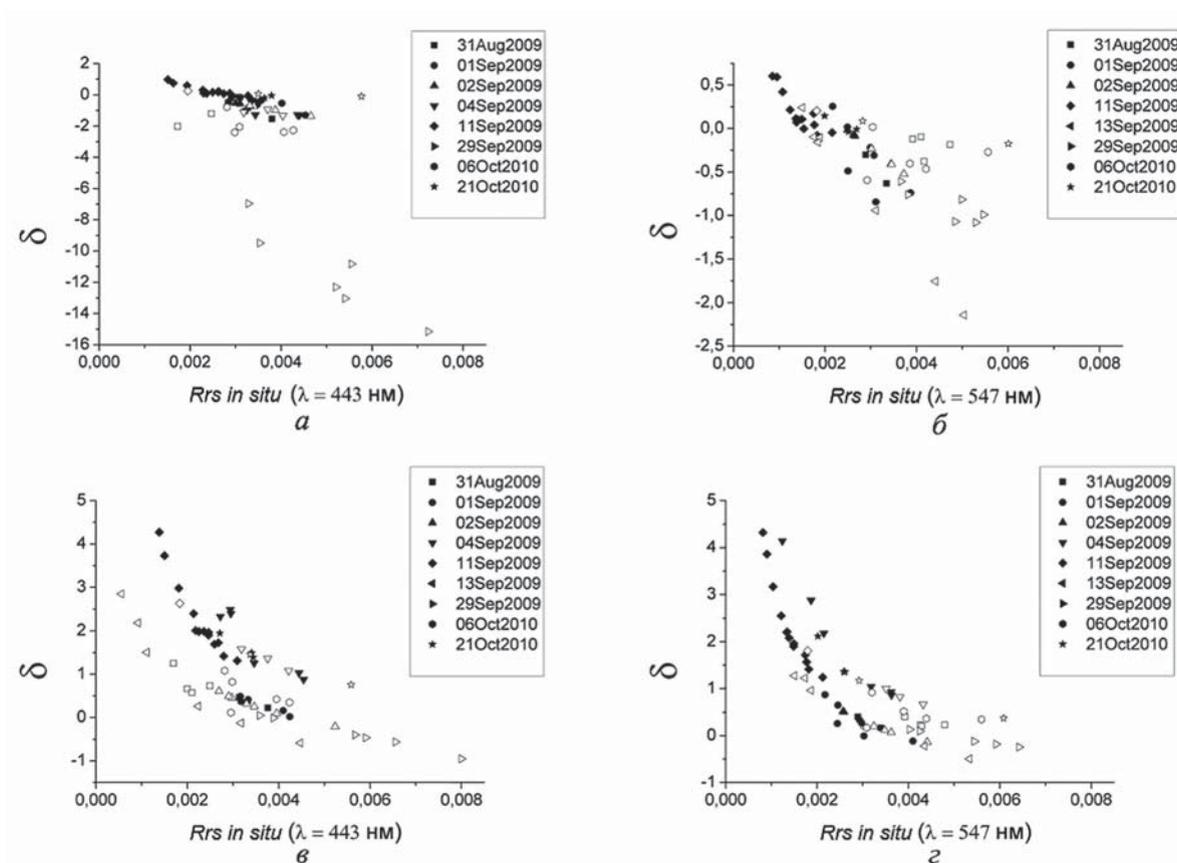


Рис. 7. Графики ошибок расчета Rrs в двух спектральных каналах для NIR (а, б) и MUMM (в, г) алгоритмов атмосферной коррекции. Не заполненные фоном фигуры относятся к измерениям излучения воды с концентрацией хлорофилла А больше 1 mg/m^3

- расчет дрейфа льда автоматическими методами по последовательности спутниковых изображений в ИК и видимом диапазонах спектра;
- расчет сплоченности льда под облачностью по данным пассивных микроволновых измерений радиометров AMSR-E и AMSR2 и расчет дрейфа льда под облачностью по картам сплоченности;
- построение композиционных карт температуры поверхности океана;
- построение карт концентраций углекислого газа и метана в атмосфере;
- расчет профилей температуры и влажности атмосферы;
- расчет биопараметров морей;
- автоматическое выделение и прослеживание синоптических вихрей океана;
- расчет скоростей течений океана.

Спутниковый центр имеет многолетний опыт информационного обеспечения рыбного промысла в Дальневосточном регионе, проводки судов во льдах, морских исследовательских экспедиций. Для получения спутниковой информации в арктических районах используется приемная станция ИТЦ «СканЭкс», расположенная в Магадане. Имеется успешный опыт совместного поиска потерявшихся судов в штормовых условиях зимнего моря [16]. Поскольку ни один спутниковый центр не в состоянии обеспечить

произвольного потребителя необходимым набором спутниковых карт, информационная система Спутникового центра Дальневосточного отделения РАН развивается как открытая система на основе общепринятых стандартов доступа к данным и услугам их обработки [17]. В частности, проведена интеграция информационной системы Спутникового центра в портал Европейского космического агентства «Еo-Portal» — одну из двух глобальных информационных систем доступа к спутниковой информации [23].

Спутниковое информационное обеспечение конкретных потребителей и анализ их задач приводит к необходимости непрерывного улучшения существующих и создания новых технологий. Часто это сводится к повышению точности продуктов обработки данных и их информативности. Для этого приходится менять подходы к методам расчета прохождения излучения через атмосферу и взаимодействия излучения с веществом, что требует развития фундаментальных основ в области оптики и динамики атмосферы и океана. Улучшение точности и информативности спутниковых данных приводит к новым возможностям их использования и росту числа решаемых задач. Сложности создания технологий для расчета геофизических параметров и их разнообразие требуют роста числа исследований в заданной области, что в силу ограниченности

ресурсов не позволяет надеяться на быстрый прогресс. Ускорение подобных работ может обеспечить создание глобальной информационной системы на основе сервисов обработки данных (Web Processing Service), в которой бы накапливались технологии обработки данных и имелся доступ к ним как разработчиков таких технологий, так и потребителей. Возможной реализацией этой концепции может стать информационная система Роскосмоса — ЕТРИС ДЗЗ. Один из вариантов развития такой системы предполагает создание региональных дата-центров с соответствующими облачными сервисами [18].

Работа поддержана программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

Литература

1. Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю. Автоматический расчет скоростей перемещений ледовых полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8, № 2. — С. 9—17.
2. Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2013. — Т. 10, № 2. — С. 131—142.
3. Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Загуменнов А. А., Шувалов Б. В. Верификация автоматического метода расчета скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений // Тезисы Международной научной конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России». 15—18 сентября 2014 г., пгт. Кацивели, Республика Крым. ЭКОСИ-Гидрофизика. — Севастополь: МГИ, 2014. — С. 65—66.
4. Алексанин А. И., Стопкин М. В. Автоматический расчет дрейфа льда по данным пассивного микроволнового зондирования // Тезисы двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10—14 ноября 2014, Москва. — М.: ИКИ РАН, 2014. — С. 230.
5. Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю. Поиск изменчивости ледовых полей в зонах сжатия и разрежения на изображениях метеорологических спутников // Тезисы двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10—14 ноября 2014, Москва. — М.: ИКИ РАН, 2014. — С. 231.
6. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций: Российская Федерация / Под общ. ред. С. К. Шойгу. — М.: Дизайн, Информация, Картография, 2010. — 696 с.
7. Беккер А. Т. Вероятностные характеристики ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 346 с.
8. Богоявленский В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4(16). — С. 48—59.
9. Завьялов П. О., Осадчиев А. А., Ижицкий А. и др. Структура гидрофизических и биооптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // Океанология. — 2015. — В печати.
10. Зацепин А. Г., Завьялов П. О., Кременецкий В. В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. — 2010. — Т. 50, № 5. — С. 698—708.
11. Зацепин А. Г., Кременецкий В. В., Кубряков А. А. и др. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море // Океанология. — 2015. — В печати.
12. Качур В. А., Алексанин А. И. Особенности атмосферной коррекции спутниковых данных цвета океана в Дальневосточном регионе // Тезисы двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10—14 ноября 2014, Москва. — М.: ИКИ РАН, 2014. — С. 44.
13. Костяной А. Г., Лебедев С. А., Соловьев Д. М., Пичужкина О. Е. Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря: Отчет 2004 г. / ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть». — [Б. м.], 2005. — 34 с.
14. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2006. — Т. 3, № 2. — С. 99—105.
15. Кубряков А. А., Станичный С. В., Зацепин А. Г., Кременецкий В. В. Распространение речных вод в Черном и Карском морях по спутниковым измерениям уровня, солености и хлорофилла А // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — 2013. — № 27. — С. 394—398.
16. Левин В. А., Алексанин А. И., Алексанина М. Г. и др. Спутниковый мониторинг ледовой обстановки в Охотском море // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. — 2011. — Вып. 10. — С. 44—49.
17. Левин В. А., Алексанин А. И., Алексанина М. Г. и др. Разработка технологий спутникового мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников // Открытое образование. — 2010. — № 5. — С. 41—49.
18. Лошкарев П. А., Тохиян О. О., Курлыков А. М. и др. Развитие ЕТРИС ДЗЗ с применением облачных технологий // Геоматика. — 2014. — № 4. — С. 22—26.
19. Лурье И. К., Косиков А. Г. Теория и практика цифровой обработки изображений: Дистанционное

- зондирование и географические информационные системы / Под ред. А. М. Берлянта. — М.: Науч. мир, 2003. — 168 с.
20. *Мастрюков С. И.* Методический подход к оценке ледовых условий плавания и оценка тенденций их изменений на примере азиатского побережья Берингова моря // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1. — С. 74—81.
21. *Махутов Н. А., Гаденин М. М., Лебедев М. П. и др.* Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне России и пути их парирования на основе концепции риска // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1. — С. 10—29.
22. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2003. — 784 с.
23. *Недолужко И. В.* Интеграция ресурсов Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН в среду SSE Европейского космического агентства // Вычислит. технологии. — 2010. — Т. 15, № 4. — С. 116—130.
24. *Рус У.* Основы дистанционного зондирования. — М.: Техносфера, 2006. — 336 с.
25. *Смирнов В. Г., Бушуев А. В., Захваткина Н. Ю., Лоцилов В. С.* Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85) — С. 62—76.
26. Центры коллективного пользования Российской академии наук. — М.: Наука, 2004. — 192 с.
27. *Шовенгердт Р. Р.* Дистанционное зондирование: Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2013. — 592 с.
28. *Baith K., Lindsay R., Fu G., McClain C. R.* Data analysis system developed for ocean color satellite sensors // EOS, Transactions American Geophysical Union. — 2001. — Vol. 82. — P. 202.
29. *Emery W. J., Thomas A. C., Collins M. J. et al.* An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // J. Geophys. Res. — 1986. — Vol. 91, № C11. — P. 12865—12878.
30. *Goyens C., Jamet C., Schroeder T.* Comparison of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters // Remote Sensing of Environment. — 2013. — № 131. — P. 63—75.
31. *Hwang B.* Inter-comparison of satellite sea ice motion with drifting buoy data // Intern. J. of Remote Sensing. — 2013. — Vol. 34, № 24. — P. 8741—8763.
32. *Jamet C., Loisel H., Kuchinke C. P. et al.* Comparison of three SeaWiFS atmospheric correction algorithms for turbid waters using AERONET-OC measurements // Remote Sensing of Environment. — 2011, № 115. — P. 1955—1965.
33. *Lagerloef G., Boutin J., Chao Y. et al.* Resolving the global surface salinity field and variations by blending satellite and in situ observations // Proceedings of Ocean.Obs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. — 2010. — Vol. 9. — P. 587—597.
34. *Lavergne T., Eastwood S., Teffah Z. et al.* Sea ice motion from low-resolution satellite sensors: An alternative method and its validation in the Arctic // J. of geophysical research. — 2010. — Vol. 115, C10032. — 14 p.
35. *Lee B., Ahn J. H., Park Y.-J., Kim S.-W.* Turbid water atmospheric correction for GOCI: Modification of MUMM algorithm // Korean J. of Remote Sensing. — 2013. — Vol. 29, № 2. — P. 173—182.
36. *Maslanik T., Agnew M., Drinkwater W. et al.* Summary of ice-motion mapping using passive microwave data / National Snow and Ice Data Center (NSIDC). — [S. l.], Nov. 1998. — 25 p. — (Special Publication 8) (http://nsidc.org/pubs/special/nsidc_special_report_8.pdf).
37. *Pascual A., Faugere Y., Larnicol G., Le Train P.-Y.* Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters // Geophys. Res. Lett. — 2006. — № 33. — P. 1—16.
38. *Pavlov V. K., Pfirman S. L.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep-Sea Res (II). — 1995. — Vol. 42, № 6. — P. 1369—1390.
39. *Ralph E., Niiler P.* Wind-driven Currents in the Tropical Pacific // J. of Physical Oceanography. — 1999. — Vol. 29. — P. 2121—2129.
40. *Rio M.-H., Hernandez F.* High-frequency response of wind-driven currents measured by drifting buoys and altimetry over the world ocean // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108 (C8). — P. 3283. — doi:10.1029/2002JC001655.
41. *Rio M. H., Guinehut S., Larnicol G.* New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // J. Geophys. Res. — 2011. — Vol. 116. — P. C07018. — doi:10.1029/2010JC006505.
42. *Ruddick K. G., Ovidio F., Rijkeboer M.* Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // Applied optics. — 2000. — Vol. 39. — P. 897—912.
43. *Ruddick K. G., Cauwer V. D., Park Y.-J.* Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters // Limnol. Oceanogr. — 2006. — Vol. 51. — P. 1167—1179.
44. *Sandven S., Johannessen O. M.* Sea ice monitoring by Remote Sensing. — Chap. 8 // Remote Sensing of the Marine Environment Manual of Remote Sensing. — 3d ed. — Vol. 6 / Ed. by J. Gower; American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. — Maryland, USA, 2006. — P. 241—283.
45. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea Ice Remote Sensing Using AMSR-E 89 GHz Channels // J. of geophysical research. — 2008. — Vol. 113. — C02S03. — 14 p.