

Проблемы спутникового дистанционного зондирования при обеспечении хозяйственной деятельности на шельфе арктических морей

Алексанин А.И.¹, Кубряков А.А.², Левин В.А.¹, Станичный С.В.²

¹*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

²*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

aleks@iacp.dvo.ru

Введение

Ведение хозяйственной деятельности в Арктике – это проведение работ 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 являются необходимыми условиями хозяйственной деятельности. Фактически 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 тематических карт различных геофизических параметров уже сейчас требуются высокотехнологичные и часто дорогостоящие средства обработки 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.

Современные способы ДЗЗ базируются в основном на измерениях спутниками в трех спектральных диапазонах: инфракрасном (ИК), видимом и микроволновом. При этом используется 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 прослеживания 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 росту новых технологий и 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 при сравнении с пассивными средствами зондирования. Во-

первых, высокое пространственное разрешение и значительные потребности спутника в энергии не позволяют зондировать ежедневно всю поверхность Земли. Во-вторых, активные зондировщики 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, покрывающем ежедневно всю Землю, является Солнце. Солнце 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 зондировщиков, несет массу информации. Так, например, в видимых каналах спектра в зоне солнечного зайчика можно рассмотреть и 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, которые были бы нацелены на мониторинг и анализ солнечного зайчика. В частности для Арктики 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 таким задачам 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 являются взаимосвязанными, и их необходимо решать совместно. Задачи разбиваются на отдельные подзадачи, технологии решения которых находятся на разных уровнях готовности и качества при применении их на практике. Подбор и адаптация соответствующих технологий друг к другу является также актуальной проблемой. Из всего разнообразия задач, связанных с добычей углеводородов, следует выделить, как наиболее востребованные, задачи создания технологий детектирования свойств морского льда, технологий обеспечения безопасности ведения хозяйственной деятельности и экологического контроля окружающей среды и задачи создания 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 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. Метод рассчитывает перемещение площадки и статистическую 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. Как результат – 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 ледовых 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 90-ых годов [36]. Современное состояние технологий обработки данных детально описано в работе [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 – 1-3 дня обычно. 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 знать, 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 89ГГц изображения AMSR2 имеет линейный размер около 5 км, в сравнении с 12.5 км у радиометра SSM/I. 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.

Новый критерий отбраковки построенных векторов 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 изолинии сечения (R_1 и R_2). Схема расчета приведена на рис.1.

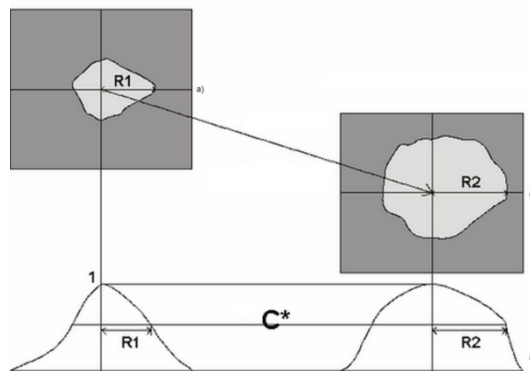


Рис. 1. Формы сечений автокорреляционных функций двух площадок и соответствующие вертикальные разрезы этих функций по линии «а». Светлые области - области автокорреляционных функций, которые больше величины максимальной кросс-корреляции C^* .

Критерий априорной оценки точности имеет размерность скорости и рассчитывается по формуле:

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

где Δt – временной интервал между изображениями, а $R^* = \max(R_1, R_2)$. Отбраковка осуществляется по заданному порогу. Эксперименты показали, что величина априорной точности A_K обычно в 2 раза хуже, чем точность расчета, что можно использовать для контроля качества строящихся карт дрейфа льда. На участках изображения, искаженных облачностью, вектора по этому критерию автоматически отбраковываются. Использование предложенного критерия отбраковки позволяет отказаться от высокоточных процедур фильтрации облачности и радиометрической коррекции изображений.

Применение критерия априорной точности расчета скорости перемещения маркеров по последовательности изображений и ряд приемов повышения точности и надежности проводимых 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 похожести площадок (помимо кросс-корреляции используется еще два критерия) и применяется иерархия расчетов с использованием площадок разного размера. Метод прошел верификацию как для построения карт дрейфа льда, так и карт скоростей поверхностных течений [2,3]. При расчете дрейфа льда метод демонстрирует точность около 5 см/сек, что соответствует наилучшей получаемой точности современными методами. Высокая точность и надежность алгоритма позволили его применять 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 отслеживаемых площадок и временной интервал между изображениями [4]. На рисунке 2 приведен пример сравнения векторов, построенных по микроволновым данным, с эталонными векторами, построенными по данным видимого канала радиометра MODIS/AQUA. Для отслеживания использовались карты сплоченности льда, рассчитываемые алгоритмом ARTIST [45] по изображениям, получаемым на частоте 89 ГГц. Уже при размерах площадки $50 \times 50 \text{ км}^2$ точность расчета скоростей дрейфа льда лежит в пределах 5 см/сек. 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 заперены 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.

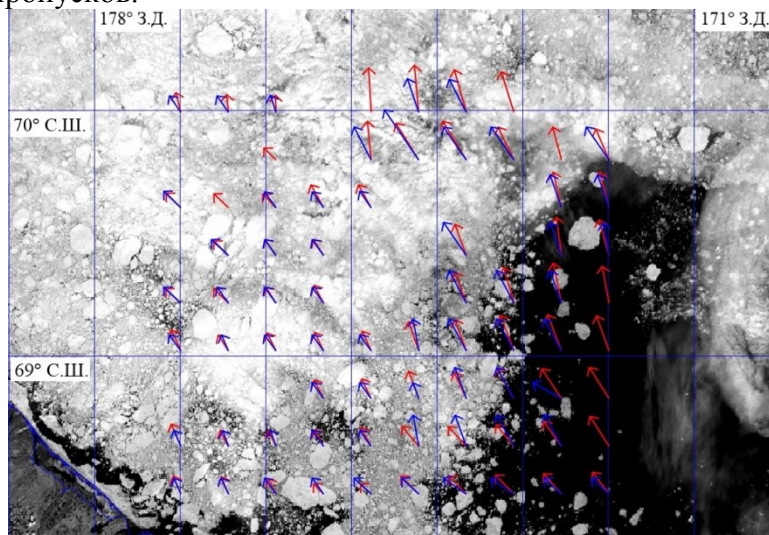


Рис.2. Скорости дрейфа льда в Чукотском море по данным радиометров MODIS (красный цвет) и AMSR-E (синий) за 16 июля 2013 (между изображениями 24 часа).

Восстановление скоростей течений по спутниковым альтиметрическим измерениям. Определение скорости течений в Арктических морях является одной из важнейших задач океанологии. Течения существенным образом влияют на перераспределение тепла, соли, биогенов в Арктическом океане, тем самым оказывая значительное влияние на экосистему бассейна и на полярный климат. В последнее время благодаря развитию современных спутниковых альтиметрических измерений появилась возможность восстанавливать скорости геострофических течений на открытых участках моря на регулярной основе. Комбинированные измерения нескольких спутниковых альтиметров позволяют определять ежедневные карты аномалии уровенной 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:

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

здесь 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. Примеры полученных по измерениям альтиметров поля поверхностной скорости геострофических течений для Карского моря изображены на рис. 3а.

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. Им было показано, что скорость дрейфового течения может быть определена как $\sim 3\%$ от скорости ветра с отклонением на $\sim 45^\circ$ вправо от направления ветра, что согласуется с оценкам [11]. Для определения скорости ветра могут быть использованы как данные атмосферных реанализов, т.к. и данные спутниковых скатеррометров. На рис.3б представлен пример поля скорости ветра по измерениям скатеррометра QuicSKAT и рассчитанные полные скорости поверхностных течений для 01.09.2008.

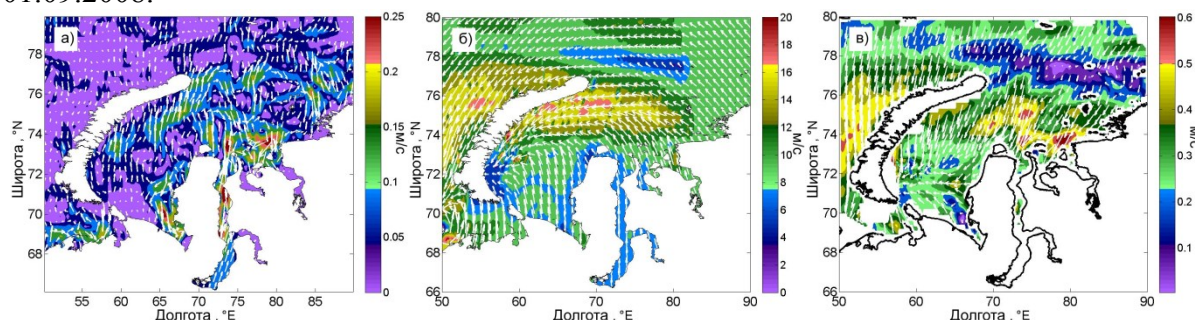


Рис.3 Геострофическая скорость, полученная по данным альтиметров (а); ветер по измерениям скатеррометра QuicSKAT (б) и полная поверхностная скорость течений в Карском море за 02.09.2008 (в).

Распространение речных вод. Одним из основных источников биогенов в океане является речной сток. Кроме того, пресные речные воды значительно увеличивают соленосную стратификацию, которая имеет важнейшее значение для холодных Арктических морей [10]. Более трети пресных вод поступают в Арктический океан в Карском море вместе с водами рек Оби и Енисея [38]. Речные воды могут распространяться различным образом в океане 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 года после запуска специально направленных для этой задачи спутников Aquarius и SMOS. На рис. 4 изображена карта спутниковой солености по данным Aquarius для августа месяца в Карском море для 2011-2013 годов. Область пониженной солености со значениями 20-27psu, соответствующая зоне речного плюма, отчетливо видна на этих картах. Эта зона хорошо совпадает с областью с повышенным значением концентрации хлорофилла А, восстановленного по оптическим измерениям MODIS (рис.5). Черной линией на рис. 4 изображены контуры фронтальной зоны плюма в поле поверхностной солености (изолиния 24 psu), построенные по данным экспедиционных исследований в сентябре 2011 [9].

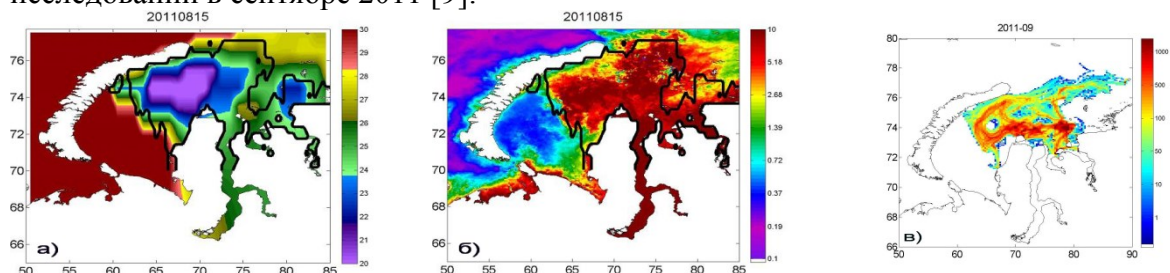


Рис. 4. Карты спутниковой солености(слева), спутникового хлорофилла(в центре) и концентраций виртуальных частиц за август 2011 года с наложенными на них

контурами фронтальной зоны в поле поверхностной солености, построенными по данным экспедиционных исследований в сентябре 2011 г.

Диаграммы рассеяния между спутниковыми и контактными измерениями солености, и между контактными измерениями солености и концентрацией спутникового хлорофилла изображенные на рис.5, 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 являются не согласованными по времени и пространству. Поэтому такая валидация имеет скорее качественный характер и показывает способность спутниковых данных идентифицировать зоны распространения пресных богатых биогенами речных вод. Коэффициент корреляции между измерениями спутниковой и контактной соленостью составляет 0.75, среднеквадратичное отклонение (СКО) ~ 2.3 psu, разница средних значений ~ 1 psu. Эти статистические характеристики являются вполне приемлемыми, учитывая 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.

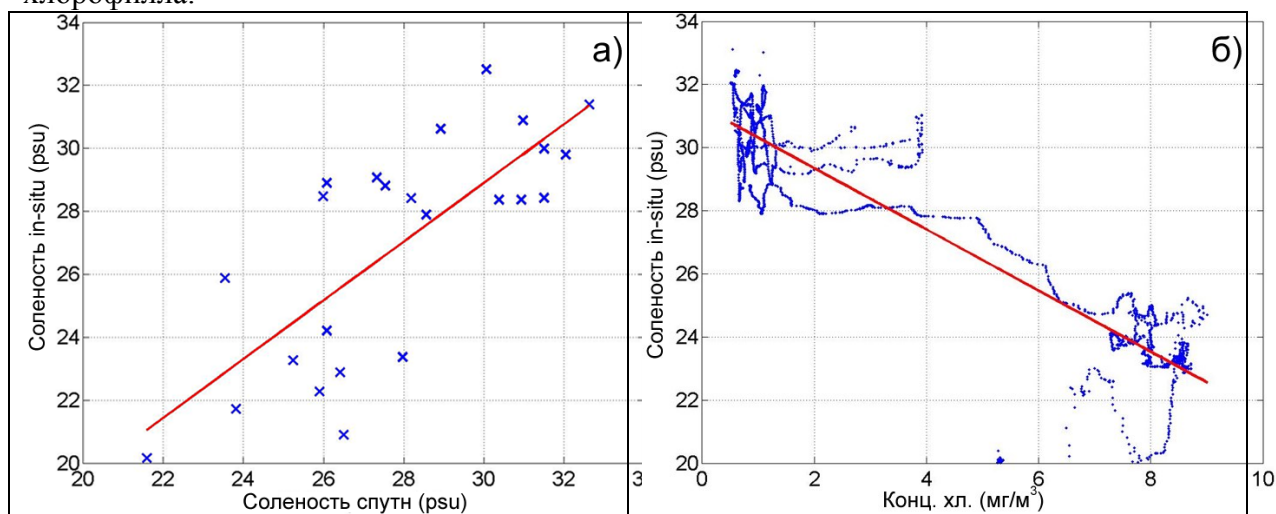


Рис.5 Диаграммы рассеяния между: а) среднемесячными измерениями спутниковыми и контактными измерениями солености и б) концентрацией спутникового хлорофилла и контактными измерениями солености.

Распространение опресненного слоя речных вод обусловлено двумя основными факторами - геострофической циркуляцией и интегральным экмановским переносом [10]. Тогда, используя известные по измерениям альтиметров и скатерометров поля полных скоростей течений можно рассчитать траекторий распространения речных вод [11,15]. Для определения 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, определенной как количество всех частиц, прошедших через каждую ячейку карты ($0.2^\circ \times 0.2^\circ$). 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, апробированный на примере распространения речного стока, можно использовать и для расчета дрейфа льда. Для этого требуется ежедневное построение скоростей дрейфа льда. Карты дрейфа льда по данным пассивных микроволновых радиометров обладают нужными свойствами. Объединение этих двух подходов позволяет решать эту актуальную задачу.

Обеспечение безопасности хозяйственной деятельности

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

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 обнаружения: обнаружение сликов, обусловленных «выглаживанием» волнения морской поверхности нефтяной пленкой и приводящим к изменению характеристик рассеяния взволнованной поверхности; обнаружение изменений спектров яркости моря. И если первый вариант обнаружения существенно зависит от близости солнечного зайчика, то второй вариант работает в произвольном регионе в дневное время и обусловлен различиями спектров диффузного рассеяния природных взвесей в море (в первую очередь фитопланктона) и рассеяния нефтяной пленкой. Второй случай 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 – это районы 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-коррекция) могут давать значения концентрации хлорофилла-а, превышающие многократно 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 NIR базируется на предположении отсутствия 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 *in situ* измерениями. Так, например, применение метода атмосферной коррекции MUMM приводило к переоценке коэффициентов яркости океана согласно [42], близости средних рассогласований измерений согласно работе [30], занижению измерений на величину около 20% согласно работе [32] и занижению измерений на величину около 40% согласно работе [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 компонент в воде менялась значительно. На рисунке 4 приведены относительные ошибки измерений, полученных в течение дня при безоблачной погоде в разных точках акватории и характеризующих во сколько раз одна величина превышает другую. 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 2009г (учет оптических характеристик аэрозоля оказывает ключевое влияние на точность расчета биопараметров). Величина ошибки δ бралась в форме отношения спутниковой оценки к прямому измерению за минусом 1, если первая превышала вторую. В противном случае использовалась обратная величина. В этом случае величине присваивался отрицательный знак. Зависимость ошибок от рассогласования измерений во времени была слабо выражена и не объясняла полученные результаты. Графики показывают, что ошибки носят в основном систематический характер. 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.

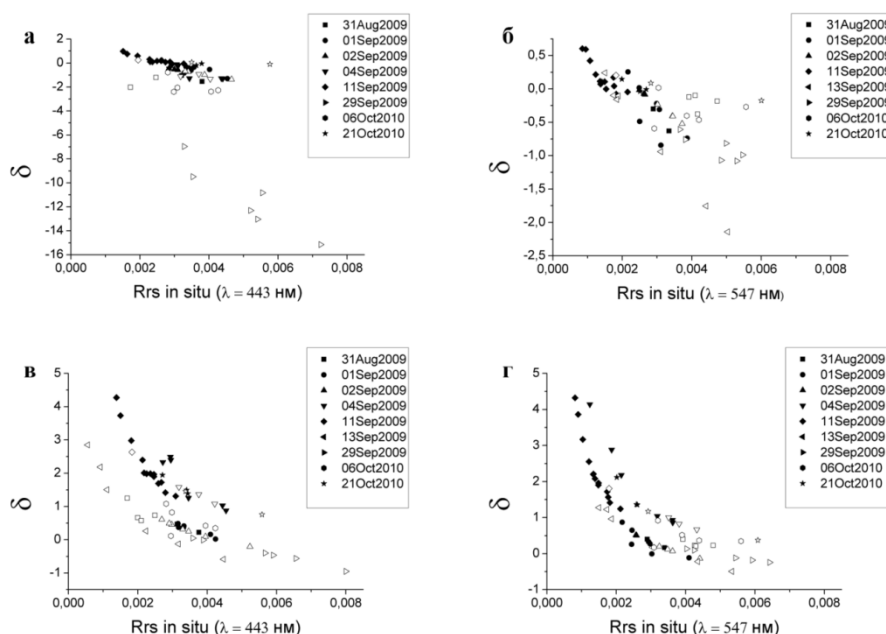


Рис.4. Ошибки расчета Rrs в двух спектральных каналах для NIR (а,б) и MUMM (в,г) алгоритмов атмосферной коррекции. Незаполненные цветом фигуры относятся к измерениям излучения воды с концентрацией хлорофилла-а больше 1 мг/м^3 .

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 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 усовершенствования расчета базовых оптических характеристик приповерхностного слоя моря.

Заключение.

Ведение хозяйственной деятельности в Арктике требует развитых средств ежедневного информационного обеспечения о состоянии океана и атмосферы. В данном 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 их апробация 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 Спутниковый центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, расположенный в г. Владивостоке [26]. Спутниковый центр – это современный четырех-антенный 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 виды работ:

- оперативная поставка изображений ледовых полей с разделением льда и облачности для выбора оптимального пути проведения ледоколом каравана судов;
- расчет кромки льда;
- 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 AMSR-2; 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 отслеживание 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 Арктическом регионе 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, то информационная система Спутникового центра ДВО 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 EoPortal – 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 технологий и создания новых. Часто это сводится к повышению точности продуктов обработки данных и их информативности. Для этого приходится менять существующие 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 требует роста числа исследований в заданной области, что в силу ограниченности ресурсов не позволяет надеяться на быстрый прогресс. Возможным подходом к ускорению подобных работ стало бы создание глобальной информационной системы на основе сервисов обработки данных (WebProcessingService), в которой бы накапливались технологии обработки данных и

имелся бы доступ к ним как со стороны разработчиков таких технологий, так и со стороны 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. А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.Ю. Карнацкий. Автоматический расчет скоростей перемещений ледовых полей. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011, **8** (2), 9-17.
2. А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.Ю. Карнацкий. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2013, **10** (2), 131-142.
3. А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.А. Загуменнов, Б.В. Шувалов. 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, 65-66.
4. А.И. Алексанин, М.В. Стопкин. Автоматический расчет дрейфа льда по данным пассивного микроволнового зондирования. *Тезисы двенадцатой Всероссийской открытой конференций "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 10-14 ноября 2014, Москва*, Москва: ИКИ РАН, 2014, 230.
5. М.Г. Алексанина, А.Ю. Карнацкий. Поиск изменчивости ледовых полей в зонах сжатия и разряжения на изображениях метеорологических спутников. *Тезисы двенадцатой Всероссийской открытой конференций "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 10-14 ноября 2014, Москва*, Москва: ИКИ РАН, 2014, 231.
6. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация/ Под общей ред. С.К.Шойгу. М.: Дизайн, Информация, Картография, 2010, 696с.
7. А.Т. Беккер. Вероятностные характеристики ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. Владивосток: Дальнаука, 2005, 346с.
8. В.И. Богоявленский. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане. *Арктика: экология и экономика*, 2014, **4**, 48-59.
9. П.О. Завьялов, А.А. Осадчиев, А.И. Ижицкий и др. Структура гидрофизических и био-оптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. *Океанология*, 2015, (в печати).
10. А.Г. Зацепин, П.О. Завьялов, В.В. Кременецкий, С.Г. Поярков, Д.М. Соловьев. Поверхностный опресненный слой в Карском море, *Океанология*, 2010, **50** (5), 698-708.
11. А.Г. Зацепин, В.В. Кременецкий, А.А. Кубряков, С.В. Станичный, Д.М. Соловьев. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море, *Океанология*, 2015, (в печати).
12. В.А. Качур, А.И. Алексанин. Особенности атмосферной коррекции спутниковых данных цвета океана в Дальневосточном регионе. *Тезисы двенадцатой Всероссийской открытой конференций "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли*

из космоса", 10-14 ноября 2014, Москва, Москва: ИКИ РАН, 2014, 44.

13. А.Г. Костяной, С.А. Лебедев, Д.М. Соловьев, О.Е. Пичужкина. Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря. Отчет 2004 г. ООО «Лукойл-Калининградморнефть», 2005, 34 с.

14. О.В. Копелевич, В.И. Буренков, В.И. Шеберстов. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2006, **3** (2), 99-105.

15. А.А. Кубряков, С.В. Станичный, А.Г. Зацепин, В.В. Кременецкий. 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**, 394-398.

16. В.А. Левин, А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, П.В. Бабяк, А.В. Громов, Ю.В. Наумкин, Е.В. Фомин, М.В. Стопкин. Спутниковый мониторинг ледовой обстановки в Охотском море. *Земля из космоса — наиболее эффективные решения*, 2011, **10**, 44-49.

17. В.А. Левин, А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, С.Е. Дьяков, И.В. Недолужко, Е.В. Фомин. Разработка технологий спутникового мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников. *Открытое образование*, 2010, **5**, 41-49.

18. П.А. Лошкарев, О.О. Тохиян, А.М. Курлыков, А.М. Курлыков. Развитие ЕТРИС ДЗЗ с применением облачных технологий. *Геоматика*, 2014, **4**, 22-26.

19. И.К. Лурье, А.Г. Косиков. Теория и практика цифровой обработки изображений. Дистанционное зондирование и географические информационные системы/ Под ред. А.М. Берлянта. М.: Научный мир, 2003, 168 с.

20. С.И. Матрюков. Методический подход к оценке ледовых условий плавания и оценка тенденций их изменений на примере азиатского побережья Берингова моря. *Арктика: экология и экономика*, 2014, **1**, 74-81.

21. Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, М.П. Лебедев, А.М. Большаков, А.П. Аммосов, А.С. Сыромятникова, М.И. Захарова, П.П. Пермьяков, Ю.С. Глянцева, О.Н. Чалая, С.Х. Лифшиц, И.Н. Зуева. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне России и пути их парирования на основе концепции риска. *Арктика: экология и экономика*, 2014, **1**, 10-29.

22. Методы компьютерной обработки изображений/ под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003, 784с.

23. И.В. Недолужко. Интеграция ресурсов Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН в среду SSE Европейского космического агентства. *Вычислительные технологии*, 2010, **15** (4), 116-130.

24. У. Рис. Основы дистанционного зондирования. Москва: Техносфера, 2006, 336с.

25. В.Г. Смирнов, А.В. Бушуев, Н.Ю. Захваткина, В.С. Лощилов. Спутниковый мониторинг морских льдов. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2010, **85** (2), 62-76.

26. Центры коллективного пользования Российской Академии Наук. М.: Наука, 2004, 192 с.

27. Р.Р. Шовенгердт. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2013, 592с.

28. K. Baith, R. Lindsay, G. Fu, C.R. McClain. Data analysis system developed for ocean color satellite sensors. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2001, **82**, 202.

29. W.J. Emery, A.C. Thomas, M.J. Collins, W.R. Crawford, D.L. Mackas. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**, No. C11, 12865-12878.

30. C. Goyens, C. Jamet, T. Schroeder. Comparison of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**, 63–75.
31. B. Hwang. Inter-comparison of satellite sea ice motion with drifting buoy data. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34** (24), 8741–8763.
32. C. Jamet, H. Loisel, C.P. Kuchinke, K. Ruddick, G. Zibordi, H. Feng. Comparison of three SeaWiFS atmospheric correction algorithms for turbid waters using AERONET-OC measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**, 1955–1965.
33. G. Lagerloef, J. Boutin, Y. Chao, T. Delcroix, J. Font, P. Niiler, F. Wentz. Resolving the global surface salinity field and variations by blending satellite and in situ observations. *Proceedings of Ocean.Obs: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, 2010, **9**, 21-25.
34. T. Lavergne, S. Eastwood, Z. Teffah, H. Schyberg, L.-A. Breivik. Sea ice motion from low-resolution satellite sensors: An alternative method and its validation in the Arctic. *Journal of geophysical research*, 2010, **115**, C10032, 14p.
35. B. Lee, J.H. Ahn, Y.-J. Park, S.-W. Kim. Turbid water atmospheric correction for GOCI: Modification of MUMM algorithm. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2013, **29** (2), 173-182.
36. T.A. Maslanik, M. Drinkwater, W. Emery, C. Fowler, R. Kwok, A. Liu. Summary of ice-motion mapping using passive microwave data. *National Snow and Ice Data Center (NSIDC) Special Publication* 8. November 1998, 25p. http://nsidc.org/pubs/special/nsidc_special_report_8.pdf
37. A. Pascual, Y. Faugere, G. Larnicol, T.P-Y. Le. Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters. *Geophys. Res. Lett*, 2006, **33**, 1-16.
38. V.K. Pavlov, S.L. Pfirman. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution. *Deep-Sea Res (II)*, 1995, **42** (6), 1369-1390.
39. E. Ralph, P. Niiler. Wind-driven Currents in the Tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, **2**, 2121-2129.
40. M.-H. Rio, F. Hernandez. High-frequency response of wind-driven currents measured by drifting buoys and altimetry over the world ocean. *J. Geophys. Res*, 2003, **108**(C8), 3283, 19P. doi:10.1029/2002JC001655.
41. M.-H. Rio, S. Guinehut, G. Larnicol. New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, C07018, 25p. doi:10.1029/2010JC006505.
42. K.G. Ruddick, F. Ovidio, M. Rijkeboer. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. *Applied optics*, 2000, **39**, 897-912.
43. K.G. Ruddick, V.D. Cauwer, Y.-J. Park. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. *Limnol. Oceanogr.*, **51**, 2006, 1167-1179.
44. S. Sandven, O. M. Johannessen. Sea ice monitoring by Remote Sensing, chapter 8, pp 241 – 283, in *Remote Sensing of the Marine Environment/* ed. by J. Gower, *Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 6*. Published by American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2006. Maryland, USA, 338 p.
45. G. Spreen, L. Kaleschke, G. Heygster. Sea Ice Remote Sensing Using AMSR-E 89 GHz Channels. *Journal of geophysical research*, 2008, **113**, C02S03, 14p.