

А.И. АЛЕКСАНИН, М.Г. АЛЕКСАНИНА, В.А. ЛЕВИН

## Развитие спутникового мониторинга в ИАПУ ДВО РАН

*Статья посвящена истории становления и развития технологий спутникового мониторинга в ИАПУ ДВО РАН. Представлены направления научно-исследовательских работ и развитие технологий обработки данных в области дистанционного зондирования Земли из космоса. Созданные технологии и подходы к анализу данных позволили провести спутниковый мониторинг наиболее крупных катастроф в Азиатско-Тихоокеанском районе, такие как авария на атомной станции Фукусима в марте 2011 г. и масштабное вредоносное цветение водорослей (фитопланктон) в акватории п-ова Камчатка в сентябре–октябре 2020 г. Адаптация созданных технологий под российские космические аппараты позволяет получать продукты обработки в соответствии с мировыми стандартами качества.*

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг, технологии обработки данных, катастрофы.

**Development of satellite monitoring in IACP FEB RAS.** A.I. ALEKSANIN, M.G. ALEKSANINA, V.A. LEVIN (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

*The article is devoted to the history of the formation and development of satellite monitoring technologies in the IACP FEB RAS. The directions of researches and development of data processing technologies in the field of remote sensing of the Earth from space are presented. The developed technologies and approaches to data analysis allowed to carry out satellite monitoring of the large disasters in the Asia-Pacific Region, such as the accident at the Fukushima nuclear power plant in March 2011 and the large-scale harmful algal blooms (phytoplankton) in the waters of the Kamchatka Peninsula in September–October 2020. The adaptation of the created technologies to the Russian satellites makes it possible to obtain processing products in accordance with international quality standards.*

*Key words:* remote sensing of the Earth, satellite monitoring, data processing technologies, disasters.

### Становление тематики

Исследование Мирового океана, проводившееся в 1970–1980-е годы в рамках программы «Разрезы» совпало с развитием в СССР спутниковой океанологии. Спутниковая компонента рассматривалась как важнейший элемент наблюдательной системы программы «Разрезы» [3]. Именно в этот период между лабораторией исследования операций (№ 52) ИАПУ ДВО РАН и Дальневосточным региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (ДВНИГМИ, Гидромет) наметилось сотрудничество по автоматизации измерений гидро- и метеопараметров окружающей среды. Возникла идея организовать прием и обработку спутниковой информации в цифровой форме для оценки характеристик деятельного слоя океана, и в первую очередь для построения цифровых карт температуры поверхности океана (ТПО). Это была центральная задача, вокруг

---

\*АЛЕКСАНИН Анатолий Иванович – доктор технических наук, руководитель ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН, заведующий лабораторией, АЛЕКСАНИНА Марина Георгиевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ЛЕВИН Владимир Алексеевич – академик, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток) \*E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

которой можно было развивать работы по проблемам мониторинга океана. Идею поддержал директор ИАПУ В.Л. Перчук, а реализовывать взялись сотрудники А.В. Казанский, Э.Э. Гербек и М.Ф. Иванов. Уже в 1982 г., в год 25-летия запуска первого искусственного спутника Земли, состоялся первый прием многоканальных изображений в оцифрованном виде с американских метеорологических спутников серии NOAA. Развитие этого направления в ИАПУ ДВО РАН поддержал директор Государственного океанографического института С.С. Лаппо (Главное управление навигации и океанографии, ГУНИО СССР). По заданию Государственного комитета по науке и технике СССР (ГКНТ) для автоматизации обработки данных были созданы и прошли успешные приемо-сдаточные межведомственные испытания программные комплексы «ДИСТРИКТ», «ДИСОРТ», «ДИПОСС». Самым крупным проектом стал программно-технический комплекс «ДИСТЕРМ», развернутый в 1986 г. на научно-исследовательском судне (НИС) «Академик Королев». В 1988–1990 гг. совместно с Институтом космических исследований (ИКИ) РАН была проведена разработка судовой станции приема и обработки цифровой многоканальной спутниковой информации высокого разрешения NOAA/HRPT. Станция была также развернута на борту НИС «Академик Королев», вошла в состав комплекса ДИСТЕРМ и использовалась в двух экспедициях по Программе изучения тайфунов. Такой корабельный комплекс был уникальным и одним из первых в мире.

В 1993 г. был создан береговой вариант станции, ставшей основой комплекса Регионального спутникового мониторинга (РСМ) ИАПУ ДВО РАН. С этого года комплекс активно используется для исследований Дальневосточных окраинных морей – и как самостоятельный инструмент, и как средство информационной поддержки морских экспедиций, и для хозяйственных нужд.

В конце 1998 г. решением директоров трех институтов (ИАПУ ДВО РАН, ТОИ ДВО РАН и ТИНРО-Центра) на базе лаборатории Спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН был создан Межведомственный центр регионального спутникового мониторинга, который с января 1999 г. стал функционировать в режиме круглосуточной службы приема, архивации, обработки и поставки тематических карт и изображений потребителям.

Оформление Межведомственного спутникового центра как центра коллективного пользования (ЦКП) произошло в 2003 г., когда был получен статус Центра ДВО РАН и официальное название «ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН». Научным руководителем Центра стал академик Владимир Алексеевич Левин (в те времена еще чл.-корр. РАН). Центр также прошел международную регистрацию как SML/IACP/RAS (Satellite Monitoring Laboratory, Institute of Automation and Control Processes, Russian Academy of Sciences). Основные задачи, которые ставились перед Центром, – создание средств и технологий спутникового мониторинга окружающей среды и поставки пользователям карт физических параметров океана и атмосферы Северо-западной части Тихого океана и прилегающих дальневосточных морей.

К 2008 г. была сформирована основная техническая и информационная база ЦКП регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Технической основой Центра стал четырехантенный комплекс, работающий на частотах 1,7 и 8 ГГц. Он позволяет сегодня принимать и обрабатывать в автоматическом режиме данные с базовой группировки спутников – полярно-орбитальных (POES NOAA, MetOp, Terra, Aqua, Suomi-NPP, FY-3, Meteor-M, JPSS-1) и геостационарных (MTSAT, Himawari, FY-2). Была завершена автоматическая система приема и обработки принимаемых спутниковых данных. Реализованы цепочки расчетов на основе международных пакетов программ AAPP, SeaDAS, RTTOV, MetOffice-1Dvar, CSPP, IMAPP и собственных программных разработок [5].

30 декабря 2013 г. от Федерального космического агентства (Роскосмос) согласно приказу № 273 получена бессрочная лицензия № 1776К на выполнение космической деятельности Спутниковым центром ИАПУ ДВО РАН.

## Основные технологии спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН

Основная цель Спутникового центра декларировалась как получение данных о состоянии окружающей среды и подстилающей поверхности в режиме реального времени, автоматизация их обработки и создание новых технологий расчета различных физических параметров для мониторинга океана и атмосферы.

Как правило, для мониторинга и диагностики по спутниковым данным конкретных объектов или явлений только имеющихся технологий часто недостаточно. Поэтому для решения ряда конкретных ключевых задач [4] осуществляется подбор спутниковой информации, разработка новых технологий и адаптация имеющихся. За предшествующие годы Спутниковым центром создано около 20 новых технологий расчета различных параметров окружающей среды по спутниковым данным и адаптированы основные существующие пакеты программ обработки спутниковой информации. Созданы оригинальные методы первичной обработки данных, а именно калибровки, атмосферной коррекции, географической привязки.

Кроме того, построены технологии расчета тематических продуктов, к ключевым из которых можно отнести следующие:

1. Биопараметры воды – концентрация хлорофилла-а; мутность; флюоресценция и алгоритмы идентификации доминирующих по биомассе водорослей.
2. Ежедневные всепогодные карты температуры поверхности океана.
3. Расчет поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений с априорной оценкой точности расчета.
4. Автоматическое выделение синоптических вихрей океана с расчетом их положения, формы, размеров и высоты уровенной поверхности.
5. Геометрические и термодинамические характеристики тайфунов и их мониторинг в автоматическом режиме.
6. Расчет характеристик льда в облачных условиях на основе комплексов данных спутников различного пространственного разрешения.
7. Профили температуры и влажности атмосферы.

К настоящему времени на основе упомянутых ранее пакетов прикладных программ и собственных программных разработок созданы средства и методы автоматического приема, накопления, распределенной обработки и поставки данных через сеть Интернет различных продуктов обработки спутниковой информации. Ряд вычислительно емких задач построения карт по спутниковым данным обеспечивает Суперкомпьютерный вычислительный центр производительностью более 50 Терафлопс. Для доступа к данным функционирует сайт (<http://www.satellite.dvo.ru>), организован FTP-доступ (<ftp://ftp.satellite.dvo.ru>). Реализованы сервисы поставки данных и метаданных. Действует система заказов данных с возможностью заказа на обработку спутниковых данных по выбранным технологиям.

На основе разработанных в 2010–2020 гг. технологий Спутниковым центром ИАПУ ДВО РАН выполнялись различные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, из которых наиболее интересны следующие:

- мониторинг трансграничных переносов в атмосфере и океане при аварии на АЭС «Фукусима-1» в марте 2011 г.;
- ежедневный автоматический мониторинг тропических циклонов в западной части Тихого океана;
- ежегодный мониторинг ледовой обстановки;
- поиск в 2011 г. в Охотском море унесенных штормом судов;
- мониторинг экологического состояния акваторий (в частности, мониторинг и исследование причин экологической катастрофы в Авачинском заливе восточного побережья Камчатки осенью 2020 г.).

## Мониторинг атмосферы и океана района АЭС «Фукусима»

11 марта 2011 г. у восточного побережья Японии произошло землетрясение мощностью 9 баллов, из-за которого возникло цунами, нанесшее огромный ущерб прибрежным районам. В результате взрывов, произошедших на АЭС «Фукусима», в окружающую среду были выброшены значительные объемы радиоактивных веществ (радионуклидов). Катастрофическое землетрясение в Японии в марте 2011 г. и разрушение АЭС «Фукусима-1» потребовали организации мониторинга радиационной обстановки на Дальнем Востоке. Заброс радиоактивного загрязнения на территорию России мог идти тремя путями: через атмосферу, с океаническими течениями и через мигрирующие биологические популяции.

С целью расчета рисков радиационного загрязнения для территории России Спутниковым центром ДВО РАН проводился ежедневный оперативный мониторинг океана и атмосферы района АЭС «Фукусима-1» [7]. Поскольку один из сотрудников Спутникового центра являлся экспертом от России в международной программе по охране окружающей среды UNEP, ему был сразу же предоставлен доступ в режиме реального времени к измерениям радиации вблизи АЭС «Фукусима». В моменты выброса радиоактивных веществ начинались расчеты их распространения в океане и атмосфере.

Для мониторинга распространения радиоактивных загрязнений через атмосферу была организована специальная обработка данных, результаты которой выставлялись в Интернет (сайт [www.satellite.dvo.ru](http://www.satellite.dvo.ru)) и обновлялись в режиме реального времени один раз в час. Для мониторинга атмосферы были запущены средства автоматической обработки данных и вывода результатов в форме фильма о движении облачности и водяного пара. Исходной информацией были изображения с геостационарного спутника MTSAT-1R (48 изображений в сутки в 5 спектральных каналах). Рассчитывались перемещения воздушных масс, проходящих над АЭС, и места выпадения осадков при прохождении зараженной воздушной массы над территорией России. Выпадающие осадки могли формировать области наиболее загрязненной поверхности.

В качестве основы для контроля циркуляции океана в районе АЭС «Фукусима» использовались композиционные карты ТПО. Была создана автоматическая процедура по построению и ежедневному обновлению карт. Карты строились и также выставлялись в Интернет в форме фильма об изменчивости ТПО района Фукусимы.

Для получения представления о циркуляции океана строились композиционные карты статистически значимых термических структур в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) [2] (рис. 1, а). ДОТК слабо зависят от облачности и используются для представления поверхностной циркуляции океана. Для расчета скоростей поверхностных течений применялся метод, основанный на автоматическом прослеживании перемещения выбранного участка изображения воды во времени с оценкой априорной точности расчета (рис. 1, б). Для автоматического слежения за вихрями синоптического масштаба, которые могут переносить зараженные воды как в «контейнере», использовался оригинальный метод автоматического поиска и выделения вихрей с расчетом их геометрических параметров и прослеживанием этих вихрей на последовательности изображений. Анализировались возможности переноса зараженных вод к побережью России.

Для оценки изменчивости радиоактивности на ближайших к АЭС пунктах наблюдения, обусловленной стоком рек после интенсивных осадков в районе АЭС и апвеллинговыми явлениями, по данным радиометра MODIS рассчитывались биооптические параметры (концентрации хлорофилла, мутность, флюоресценция). Фитопланктон, являющийся началом кормовых цепочек в океане, поглощает биогенные элементы и может накапливать радиоактивные изотопы. Концентрация хлорофилла-а – пигмента, характеризующего объемы фитопланктона в прибрежной зоне АЭС, была высокая (более 1 мг/м<sup>3</sup>). Распространение радиации через фитопланктон и далее по пищевой цепочке через промысловых рыб в прибрежной зараженной зоне было возможно. Со времени прекращения

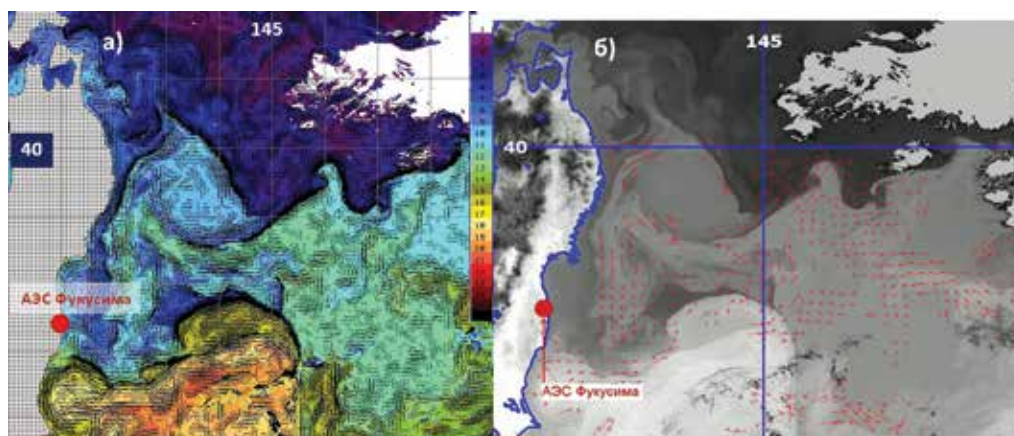


Рис. 1. Спутниковая карта ТПО с нанесенными доминантными ориентациями контрастов (слева) и рассчитанными векторами скорости поверхностных течений (справа) за 14.04.2011 г. 06:29:13UTC, радиометр AVHRR/NOAA-15, виток 7162

интенсивных радиоактивных выбросов от АЭС первый тропический циклон, прошедший над о-вом Хонсю, был в августе. В результате его прохождения рост концентрации радиоактивного цезия не превысил уровня радиоактивности в 90 Бк/л, что указывает на незначительность последствий смывания радиоактивной почвы в море. Апвеллинговые явления также не приводили к росту радиации в прибрежной зоне. На это указывал низкий уровень радиоактивности около АЭС, наблюдавшийся в течение всего лета и позже.

Одновременно со спутниковыми данными анализировались данные лучших прогнозных моделей. Это модели динамики атмосферы (университет г. Бремен) и океана (университет г. Тулуза). Модель динамики океана показала хорошие результаты при сравнении со спутниковыми данными. Модель динамики атмосферы не всегда соответствовала действительности.

Были получены следующие выводы. Динамика атмосферы благоприятствовала России. Возможные выбросы радиоактивных веществ через атмосферу могли быть только спустя значительное время (больше месяца), когда выбросы на АЭС уже прекратились. Система течений препятствовала переносу загрязнений в российские территориальные воды. Была небольшая вероятность получить радиацию через рыб, нерестившихся в районе Фукусимы. В первую очередь это сайра. Поскольку жизненный цикл сайры 3 года, то следовало контролировать ее радиоактивность в течение этого времени. Дольше не требовалось, так как радиоактивные элементы фактически не смывались в море в значительном количестве.

### Мониторинг ледовой обстановки и спасение на море

Уже более 10 лет Спутниковый центр ДВО РАН ведет мониторинг ледовой обстановки в Охотском море на регулярной основе. Для обеспечения информационной поддержки ледовой проводки судов к порту Магадан в период зимней навигации с 1 января по 31 мая оперативно через FTP-сервер поставляются продукты обработки спутниковых данных. Эта информация необходима для прокладки оптимального маршрута ледокола и судов. Созданные технологии позволяют также успешно искать суда, потерявшиеся в штормовом море.

Зимой 2010/2011 г. Спутниковый центр ДВО РАН принимал участие в поиске пропавших в Охотском море судов. 6 декабря 2010 г. унесло баржу. В Сахалинском заливе

30–31 декабря 2010 г. в ледовый плен попало сразу 10 судов. В Татарском проливе у Сахалина 7 января 2011 г. потерялась рыболовецкая шхуна «Партнер» с экипажем из 14 человек. В юго-восточной части Сахалина 11 января 2011 г. унесло буксир «Прогресс-2». Западнее Камчатки 16 февраля 2011 г. потерялся траулер «Аметист» вместе с экипажем из 24 человек. Поскольку детальную информацию о пропавших судах с экипажами МЧС не предоставляет, то велся поиск потерявшихся судов без экипажей. Информация о судах поступала с опозданием в 5–7 дней. Нужно было рассчитать районы поиска по данным метеорологических спутников и либо сделать высокдетальную спутниковую съемку района, либо навести поисковые группы на потерявшийся объект.

Чтобы навести достаточно дорогую высокоточную спутниковую съемку на район поиска, необходимо сделать прогноз возможного местоположения судна за прошедшее время. Для этого требуется знать скорости поверхностных течений, силу и направление ветра, а также парусность судна. Модельные расчеты ветра и течений не всегда совпадают с реальными значениями. Поэтому необходимо использовать весь комплекс информации: многолетние наблюдения за течениями, редкие прямые измерения, прогнозные оценки ветра и непосредственные расчеты дрейфа по временной последовательности спутниковых изображений.

Успешным примером применения данного подхода явился поиск потерявшейся в январе 2011 г. в районе Удской губы баржи, которую отнесло к Шантарским островам. По данным Спутникового центра ДВО РАН был вычислен предполагаемый район поиска в акватории Охотского моря. Это позволило ИТЦ СКАНЭКС произвести спутниковую съемку локатором с синтезированной апертурой и найти баржу [6]. Аналогично в том же году расчет дрейфа льда по данным радиометра MODIS позволил идентифицировать лед, рассчитать его динамику под полупрозрачной облачностью и в совокупности со знанием прогнозного ветра и расчетом дрейфа судна навести самолет и найти буксир «Прогресс-2».

### Анализ причин экологической катастрофы на Камчатке осенью 2020 г.

Во второй половине сентября 2020 г. в прибрежной акватории п-ова Камчатка произошла экологическая катастрофа, которая сопровождалась массовой гибелью морских гидробионтов. Наиболее разумной гипотезой, объясняющей явление, была гипотеза академика А.В. Адрианова о массовом и/или вредоносном цветении микроводорослей рода *Karenia* (фитопланктон). Из-за нерегулярности *in situ* наблюдений в этом регионе спутниковые методы мониторинга акваторий оказались основным инструментом выяснения причин катастрофы.

Стандартные алгоритмы NASA, используемые для расчета биопараметров, дают ошибки в сотни процентов при низких углах солнца, соответствующих условиям наблюдения. Для получения приемлемых оценок использовалась нестандартная MUMM-коррекция атмосферы при расчете биопараметров моря. Массовое цветение – не всегда вредоносное, и наоборот. Массовое цветение микроводорослей наблюдалось в сентябре и октябре, а вредоносное воздействие было только во второй половине сентября.

Для доказательства вредоносного воздействия микроводорослей анализировались стадии их развития: резкий рост биомассы при избытке биогенов, стагнация и дефицит питательных веществ, смена вида доминирующей водоросли. В качестве используемых признаков были взяты рассчитываемые по нестандартной схеме концентрация хлорофилла-а; эффективность фотосинтеза; прогиб спектра яркости моря, характерный для водорослей рода *Karenia*. Последний рассчитывался по формуле

$$F_{\lambda} = (Rrs(\lambda_2) \cdot (\lambda - \lambda_1) + Rrs(\lambda_1) \cdot (\lambda_2 - \lambda)) / 2 / (\lambda_2 - \lambda_1) / Rrs(\lambda),$$

где  $Rrs(\lambda)$  – коэффициент s яркости моря  $Rrs$  (remote sensing reflectance) для длин волн  $\lambda = 488$  нм,  $\lambda_1 = 412$  нм,  $\lambda_2 = 555$  нм.

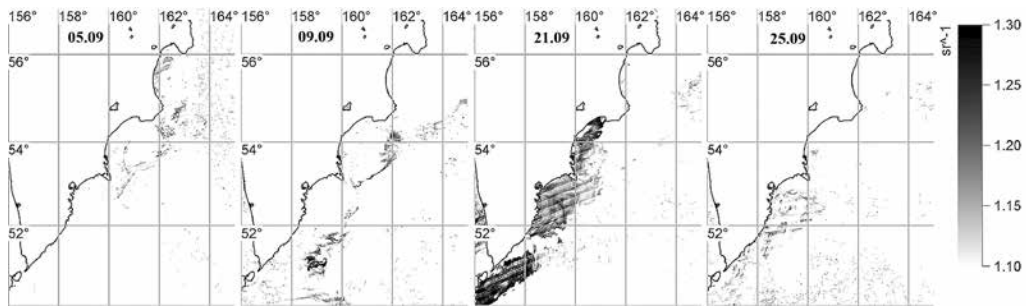


Рис. 2. Прогиб спектра яркости моря  $F_{488}$  в диапазоне величин, соответствующем значимому присутствию в пробах водорослей рода *Karenia*, за 5.09, 9.09, 21.09, 25.09 2020 г. Радиометр MODIS/AQUA

На рис. 2 приведена изменчивость параметра  $F_{488}$  в сентябре и октябре 2020 г. Параметр выведен в диапазоне величин 1,1–1,3, соответствующем значимому присутствию в воде водорослей рода *Karenia*. Можно наблюдать фактически отсутствие водорослей *Karenia* пятого сентября, нарастание и достижение пика численности к 21 сентября. 25 сентября значимого присутствия водоросли рода *Karenia* не наблюдалась.

21 сентября концентрация водорослей рода *Karenia* была значительной. В октябре она была еще больше, но катастрофических воздействий на окружающую среду в этом месяце не было, так как отсутствовал механизм повышения концентрации продуктов жизнедеятельности фитопланктона у побережья. Ключевыми датами экологической катастрофы на Камчатке являются 19, 20 и 21 сентября. 19-го был шторм с доминирующим северо-западным ветром, вызвавший сильный апвеллинг. Возникла неустойчивая стратификация воды, которая удерживалась ветром. 21 сентября наступил почти полный штиль, что привело к даунвеллингу, собирающему обычно продукты жизнедеятельности фитопланктона у побережья [9, 10]. При этом была смена доминирующей по биомассе водоросли, так как параметр  $F_{488}$  на изображении за 25 сентября резко уменьшился. Окончание цветения сопровождается массовым отмиранием клеток. Стратификация быстро восстановилась: холодная вода ушла в океан, перемещаясь в нижних слоях, а теплая вода двинулась на ее место, перемещаясь в верхнем приповерхностном слое. Теплая вода опускалась вниз, а все, что было легче воды и плавало на поверхности, собиралось и концентрировалось вблизи побережья. То есть это гниющая биомасса, продукты жизнедеятельности фитопланктона (растворенное органическое вещество и метаболиты, возможно, являющиеся токсинами).

### Создание технологий обработки данных с российских спутников

Спутниковый центр ДВО РАН, получив лицензию от Роскосмоса, провел ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заданию его подразделений. Работы были посвящены созданию технологий первичной и тематической обработки данных с российских космических аппаратов, а также разработке средств и методов доступа к зарубежным информационным ресурсам в рамках разрабатываемой в Роскосмосе Государственной информационной системы оперативной поставки данных дистанционного зондирования Земли (ГИС ОПД ДЗЗ). Разрабатывались собственные технологии обработки спутниковых данных и проводился анализ поставляемых Роскосмосом продуктов обработки данных с аппаратов Ресурс-П №1 и 2 (прибор Геотон), Канопус-В,-3,-4,-ИК (камеры ПСС, МСС и МСУ-СРМ), Метеор-М-2 и 2-2 (приборы МСУ-МР и КМСС), Электро-Л-2 (радиометр МСУ-ГС).

Совместно с отделом Главного конструктора космических аппаратов инфракрасного спектрального диапазона решена задача учета криоосадков, оседающих на стенках

датчиков из влаги, захваченной при старте ракеты. Созданы алгоритмы автоматической географической привязки изображений, калибровки, построены алгоритмы расчета температуры поверхности океана для спутников Метеор-М [8]. Показано соответствие полученных результатов мировым стандартам качества. Проверено качество изображений спутников высокого пространственного разрешения Ресурс-П и Канопус-В. Технические характеристики приборов дистанционного зондирования Земли на вновь запускаемых спутниках не уступают зарубежным аналогам, а порой и превосходят их. Но из-за низкой точности первичной обработки данные не представлены широко на рынке, особенно на внешнем. Созданы алгоритмы автоматического совмещения изображений разных каналов и разных спутников с оценкой точности совмещения в каждом пикселе [1]. Совмещение изображений обычно происходит с подпиксельной точностью. Были оценены геометрические искажения и точность калибровки изображений, поставляемых Национальным центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) Роскосмоса. Проверялось наличие оптических аберраций и нелинейных искажений «сырых» изображений (прошедших только склейку микрокадров) и изображений в меркаторской проекции. Результаты позволили сделать тот вывод, что оптических аберраций у приборов нет, качество геометрии изображений обработки уровня 1 и 2 хорошее. Особенно хорошие результаты показывает недавно созданная Роскосмосом технология АПОИ (автоматическая потоковая обработка информации), работающая в автоматическом режиме и дающая географически хорошо привязанные изображения спустя несколько часов после пролета спутника. Технология использует тот же подход, что практикуется и развивается в Спутниковом центре с 2005 г. Ошибки калибровок российских аппаратов иногда значительные и имеют систематический характер, т.е. их можно исправить путем перекалибровки. С этой целью создана и апробирована модель расчета излучения, отраженного от подстилающей поверхности и проходящего через атмосферу на спутник.

### **Обнаружение рубок деревьев по теням**

Разработанные алгоритмы первичной обработки данных высокого пространственного разрешения с российских спутников позволили подойти к задаче создания алгоритма автоматического определения вырубки отдельных деревьев. Задача актуальна для Приморского края в связи с массовыми незаконными рубками. Практикуются рубки отдельных деревьев ценных пород, обнаружить которые можно только по данным высокого разрешения вручную. В качестве данных использовались изображения прибора Геотон спутника Ресурс-П №1 (пространственное разрешение 0,7 м).

Применяемый подход основывался на том, что при вырубке дерева вместо существовавшей освещенной кроны появляется тень. Части деревьев, которые были затенены кроной вырубленных деревьев, освещаются, и в этих местах появляются более яркие участки, чем были ранее. То есть тень исчезает.

Особенности изображений тени:

- тени малы по площади, нужно точное совмещение изображений (с пиксельной точностью);
- теней много, нужно анализировать их изменчивость со временем;
- рассогласование во времени съемки приводит к массовой изменчивости теней;
- полупрозрачная облачность и тени от облаков также генерируют массу дополнительных теней.

Контроль незаконных рубок проводился в Красноармейском районе в рамках эксперимента Администрации Приморского края. С учетом всех перечисленных особенностей необходимый алгоритм был разработан [1]. Результаты его тестирования показали следующее. При разных углах съемки генерируется огромное число аномалий яркости. При огромном количестве теней и условий, их генерирующих, обнаруженных изменений



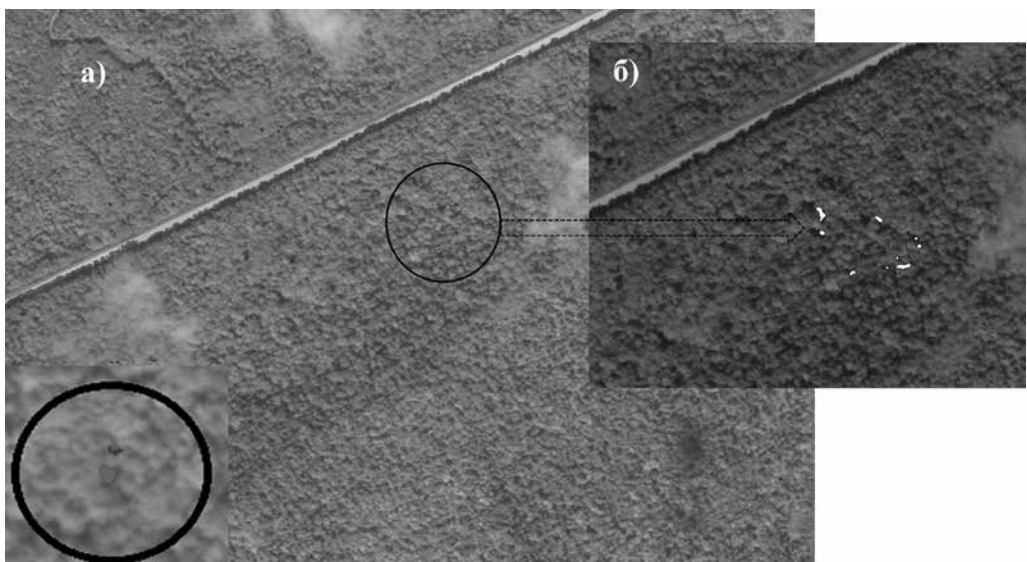


Рис. 3. Изображение лесного полога за 25.08.2015 г. слева (а) с выделенными аномалиями пониженной (красный цвет) и повышенной (синий цвет) яркостей. Кругами обведены зоны обнаружения и их вид в полном разрешении. Справа (б) результат обнаружения рубок, наложенный на изображение за 14.09.2015 г.

полога леса, устойчиво проявляющихся на последовательности изображений, немного. Высокоточное совмещение пологів леса и процедуры фильтрации ложных объектов оставляют незначительное количество аномалий. Близко расположенные аномалии разного знака указывают на изменения в лесном пологе. Пример работы алгоритма приведен на рис. 3. В данном примере незаконные рубки нескольких деревьев подтверждены представителями Всемирного фонда дикой природы (WWF).

### Заклучение

Технологии спутникового мониторинга окружающей среды разрабатываются в ИАПУ ДВО РАН в течение 40 лет. Основное направление исследовательских работ – извлечение из спутниковой информации различных физических параметров. Создаваемые методы расчета доводятся до технологий, оформляемых в виде соответствующего программного обеспечения, и внедряются в практику работы Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Спутниковый центр определяется и характеризуется не столько наличием антенных комплексов, сколько набором специально подобранных технологий обработки спутниковой и сопутствующей подспутниковой информации. В мире накоплено значительное количество доступных технологий, но при решении конкретных задач их часто недостаточно. Поэтому развитие Спутникового центра ДВО РАН ведется на принципах подбора источников данных и технологий их обработки для ряда ключевых задач мониторинга океана и атмосферы, которые должны быть увязаны друг с другом по характеристикам информативности и точности оцениваемых параметров окружающей среды. Довольно часто для решения конкретной задачи существующих технологий не хватает, поэтому приходится создавать собственные. Наличие подобных подобранных и созданных технологий и позволило Спутниковому центру ИАПУ ДВО РАН эффективно решать задачи мониторинга радиационной обстановки при аварии на АЭС «Фукусима», искать потерявшиеся в штормовом море суда и определить причины и механизмы экологической катастрофы в акватории п-ова Камчатка в 2020 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексанин А.И., Ким В., Морозов М.А., Фомин Е.В. Обнаружение рубок отдельных деревьев по теням на основе снимков прибора «Геотон» спутника «Ресурс-П» // *Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 5. С. 174–182.
2. Алексанина М.Г., Еременко А.С., Загумённых А.А., Качур В.А. Вихри в океане и атмосфере: расчет по спутниковым изображениям // *Метеорол. и гидрология*. 2016. № 9. С. 41–54.
3. Коротаяев Г.К. Оперативная океанография – новая ветвь современной океанологической науки // *Вестн. Рос. акад. наук*. 2018. Т. 88, № 7. С. 579–588. – <http://ras.jes.su/ras Herald/s086958730000081-7-1> DOI: 10.31857/S086958730000081-7
4. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Задачи и проблемы спутникового информационного обеспечения мониторинга океана и атмосферы на Дальнем Востоке // *Вестн. ДВО РАН*. 2007. № 4. С. 95–110. – <https://cyberleninka.ru/article/n/zadachi-i-problemy-sputnikovogo-informatsionnogo-obespecheniya-monitoringa-okeana-i-atmosfery-na-dalнем-vostoke>
5. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Дьяков С.Е., Недолужко И.В., Фомин Е.В. Разработка технологий спутникового мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников // *Открытое образование*. 2010. № 5. С. 41–49.
6. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Бабяк П.В., Громов А.В., Наумкин Ю.В., Фомин Е.В., Стопкин М. В. Спутниковый мониторинг ледовой обстановки в Охотском море // *Земля из космоса – наиболее эффективные решения*. 2011. Вып. 10. С. 44–49.
7. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Бабяк П.В., Громов А.В., Дьяков С.Е., Загумённых А.А., Ким В., Стопкин М.В., Фомин Е.В. Технологии спутникового мониторинга атмосферы и поверхности океана района АЭС Фукусима // *Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9, № 1. С. 187–196.
8. Alexanin A.I., Geknin Yu.M., Diakov S.E., Zaitsev A.A., Kachur V.A. Cryoprecipitation influence accounting in IR-channels calibration of MSU-MR radiometer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. Vol. 54. N 9. P. 1357–1363. – <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0001433818090025>
9. Hetland R.D., Campbell L. Convergent blooms of *Karenia brevis* along the Texas coast // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. L19604, 10.1029/2007GL030474.
10. McGillicuddy D.J., Signell R.P., Stock C.A., Keafer B.A., Keller M.D., Hetland R.D., Anderson D.M. A mechanism for offshore initiation of harmful algal blooms in the coastal Gulf of Maine // *J. Plankton Res.* 2003. Vol. 25. P. 1131–1138.