

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Данные измерений полярно-орбитальных и геостационарных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) приобретают все большее значение при решении задач оперативной гидрометеорологии, мониторинга состояния окружающей среды (включая контроль чрезвычайных ситуаций и загрязнений природной среды), накопления и анализа рядов данных по геофизическим параметрам, характеризующим климат Земли и его изменения.

В соответствии с Федеральной космической программой России до 2015 г. (ФКП - 2015) запланировано развитие отечественной космической системы наблюдения Земли, в том числе создание постоянно действующей группировки оперативных метеорологических спутников в составе двух геостационарных космических аппаратов серии «Электро» и трех полярно-орбитальных космических аппаратов серии «Метеор» (включая специализированный спутник океанографического назначения), см. рис. 1. В настоящее время осуществляется также разработка уникальной (не имеющей мировых аналогов) системы спутников на высокоэллиптических орбитах

«Арктика», предназначенной для мониторинга полярных регионов. Вся информация с перспективных российских метеорологических спутников будет оперативно приниматься и обрабатываться на наземном комплексе Росгидромета приема, обработки, архивации и распространения спутниковых данных (НКПОР).

НКПОР Росгидромета включает в себя три объединенных в единую систему центра федерального уровня (Европейский центр: ГУ «НИЦ «Планета» Москва – Обнинск – Долгопрудный; Западно-Сибирский: г. Новосибирск; Дальневосточный: г. Хабаровск) и более 70 автономных пунктов приема спутниковой информации (рис. 2). ГУ «НИЦ «Планета» является крупнейшим спутниковым центром России (и одним из самых крупных мировых центров) по объемам принимаемых космических данных, номенклатуре выпускаемой информационной продукции, количеству потребителей и представляет Росгидромет во всех международных организациях, координирующих деятельность и развитие спутниковых систем ДЗЗ. Наземный комплекс Росгидромета

обеспечивает получение оперативной космической информации по всей России и прилегающим территориям (более 20 % суши Земного шара). Создаваемые российские космические комплексы метеорологического и океанографического назначения позволят получать новые виды данных, необходимых для решения задач гидрометеорологии, мониторинга изменений климата, обеспечат преемственность ведения спутникового мониторинга состояния природной среды (облачность, осадки, ледовый, снежный и растительный покровы, наводнения, пожары и т.д.) по огромной территории [1, 2].

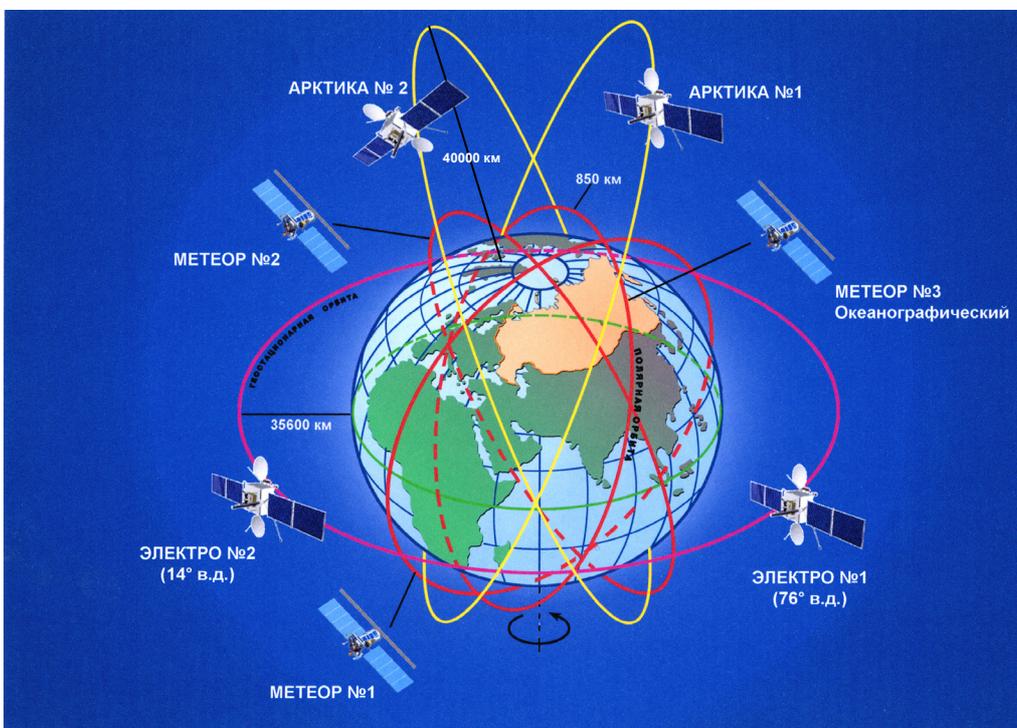


Рис. 1. Российская спутниковая гидрометеорологическая система

В связи с предстоящим в ближайшее время запуском в рамках ФКП-2015 космических аппаратов «Метеор-М» и «Электро-Л», на НКПОР Росгидромета была проведена доработка и модернизация технических и программных средств обеспечения приема информации с бортовых измерительных комплексов новых российских космических аппаратов. Произведено дооснащение части технического оборудования НКПОР Росгидромета взамен устаревшего, созданного еще в 70 – 80-е годы прошлого столетия.

Для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на основе информации новых российских космических аппаратов в ГУ «НИЦ «Планета» были подготовлены базовые варианты автоматизированных рабочих мест (АРМ), позволяющие получать различную спутниковую информационную продукцию. Всего подготовлено 15 АРМ для обработки и анализа данных КА «Электро-Л» и 21 АРМ для КА «Метеор-М». Отработка АРМ производилась на тестовой информации, включая информацию зарубежных спутников (часть бортовой аппаратуры КА «Метеор-М» и КА «Электро-Л» по своим характеристикам имеет аналоги на зарубежных спутниках), или по архивным данным.

По мере развития технических средств НКПОР Росгидромета в ГУ «НИЦ «Планета» развивались и совершенствовались технологии обработки и архивации спутниковых данных. В создании этих технологий наряду с сотрудниками ГУ «НИЦ «Планета» принимали участие специалисты ряда других научных учреждений, включая РГ РТА (Рязань), ИВМ и МГ СО РАН, ИКИ РАН и др.

Разработанные и действующие в ГУ «НИЦ «Планета» оперативные технологии мониторинга атмосферы, водной среды и земных покровов на основе совместного анализа и использования различных видов спутниковой и наземной информации обеспечивают:

- обнаружение и мониторинг стихийных гидрометеорологических явлений (СГЯ) в атмосфере (сильные осадки, грозы, град, штормы, тропические циклоны и т.п.);
- оперативное картирование ледовой обстановки (в том числе экстремальной) на внутренних и окраинных морях России;
- мониторинг наводнений на реках России;
- мониторинг пожаров на территории России;
- мониторинг состояния водной среды Черного и Азовского морей и др.

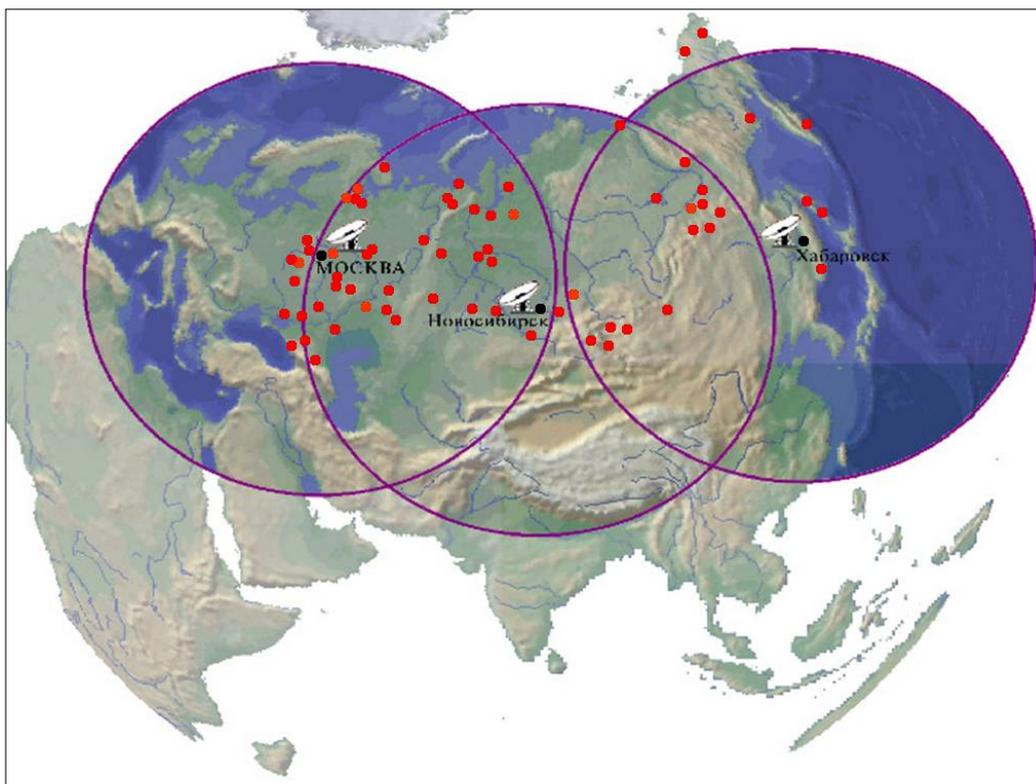


Рис. 2. Наземный сегмент космической подсистемы наблюдения Росгидромета

Примером таких технологий и программных комплексов является многофункциональная система «PlanetaMeteo» предварительной и тематической обработки информации видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов, поступающей с отечественных и зарубежных ИСЗ. В программной среде, поддерживающей данную технологию, реализовано сочетание автоматизированных и интерактивных процессов. В автоматизированном режиме осуществляется предварительная обработка спутниковых изображений (географическая привязка, трансформирование космических изображений в заранее сформированные картографические основы, составление обзорных монтажей, цветовой синтез многозональных изображений). В интерактивном режиме осуществляется дешифрирование на космических снимках различных параметров природной среды:

для облачного покрова (положение границ крупномасштабных облачных образований, струйных течений, центров облачных вихрей, типов облачности и др.); для ледяного покрова (возраст, сплоченность, формы льда, обобщенные характеристики и др.); для водной среды (положение струй морских течений, прибрежных антициклонических вихрей, циклонических вихрей, вихревых диполей, границ распространения взмученных вод, нефтяных загрязнений и др.). Результаты дешифрирования представляются на картах в соответствии с требованиями ВМО [2, 3].

Рассмотрим еще один пример базового (и более алгоритмически сложного) программного комплекса «PlanetaMonitoring», реализующего технологию автоматизированного распознавания и классификации природных объектов по многозональным спутниковым изображениям. В программной среде, поддерживающей эту технологию, реализованы методы распознавания и классификации без обучения (кластерный анализ) и с обучением по тестовым участкам, а также преобразования декорреляции и фильтрации многоспектральных спутниковых данных. Кластерный анализ позволяет группировать элементы изображения на основе близости в многомерном спектральном пространстве. Результаты кластерной обработки применяются для выбора тестовых участков, используемых в распознавании с обучением. В подсистеме распознавания с обучением используется 9 классификаторов, из которых один пиксельный и 8 контекстных, учитывающих связи внутри некоторой окрестности каждого пикселя и различающихся способом описания этих связей. Выбор оптимального (с точки зрения точности распознавания) решающего правила производится на этапе обучения по результатам классификации тестовых участков. Технология нашла широкое применение при проведении классификации почвенно-растительного покрова, материкового, шельфового и морского льда, характеристик водной среды и др., а также для привязки выделенных классов к реальным объектам.

В целом, на базе описанных технологий приема, обработки, архивации и распространения спутниковых данных, ГУ «НИЦ «Планета» *ежедневно* выпускает **более 80-ти видов** оперативной спутниковой информационной продукции и обеспечивает на регулярной основе **более 200 потребителей** федерального и регионального уровней.

Ниже даны примеры оперативной спутниковой продукции, получаемой с помощью созданных технологий и систем обработки.

Мониторинг параметров облачного покрова и СГЯ в атмосфере

К основным видам обзорной спутниковой информационной продукции, выпускаемым в ГУ «НИЦ «Планета», относятся глобальные карты облачности и подстилающей поверхности северного полушария, южного полушария и тропической зоны. Карты строятся на основе централизованного сбора и обработки информации с 5-ти геостационарных спутников. В процессе построения карт осуществляется монтаж одноканальных или цветосинтезированных изображений, принятых со всех спутников в одно и то же время, при этом используется технология «бесшовного» соединения изображений в зонах перекрытия (рис. 3). Тем самым обеспечивается полное покрытие земного шара в широтном поясе от 60° с.ш. до 60° ю.ш. с частотой обновления карт в 30 мин. Последовательные ряды таких карт позволяют проследить эволюцию крупномасштабных облачных систем.

Весьма полезной для синоптического анализа и прогноза погоды является карта нефанализа (рис. 4), которая готовится оперативно по монтажах снимков ИСЗ NOAA (в режиме интерактивного дешифрирования), отдельные СГЯ или прогностические признаки СГЯ отмечены на карте специальными значками.

Непосредственное отношение к детектированию СГЯ имеют данные об осадках. Общая особенность этих продуктов – они получаются либо на основе совместного анализа данных AMSU и AVHRR КА серии NOAA, либо путем совместного анализа данных в ИК каналах аппаратуры SEVIRI КА МЕТЕОСАТ-9, наземных измерений на метеорологических станциях и краткосрочных метеорологических прогнозов. Регулярно производятся карты средней интенсивности и типа осадков (дождь, снег, смесь), карты максимальной интенсивности осадков (рис. 5). Перечисленные информационные продукты предназначены для использования при анализе и прогнозе условий для полета авиации, а также в схемах численного локального прогноза погоды.

С начала 2006 года ГУ «НИЦ «Планета» регулярно осуществляет мониторинг тропических циклонов. Выпускаются карты траекторий тропических циклонов для Атлантического, Индийского, Тихого и Мирового (рис. 6) океанов за квартал, полугодие и год. Одновременно выполняется статистический анализ параметров этих циклонов за тот же период, включая оценки скорости движения, продолжительности существования, общей длины траектории, широты зарождения, разрушения,avorота циклонов.

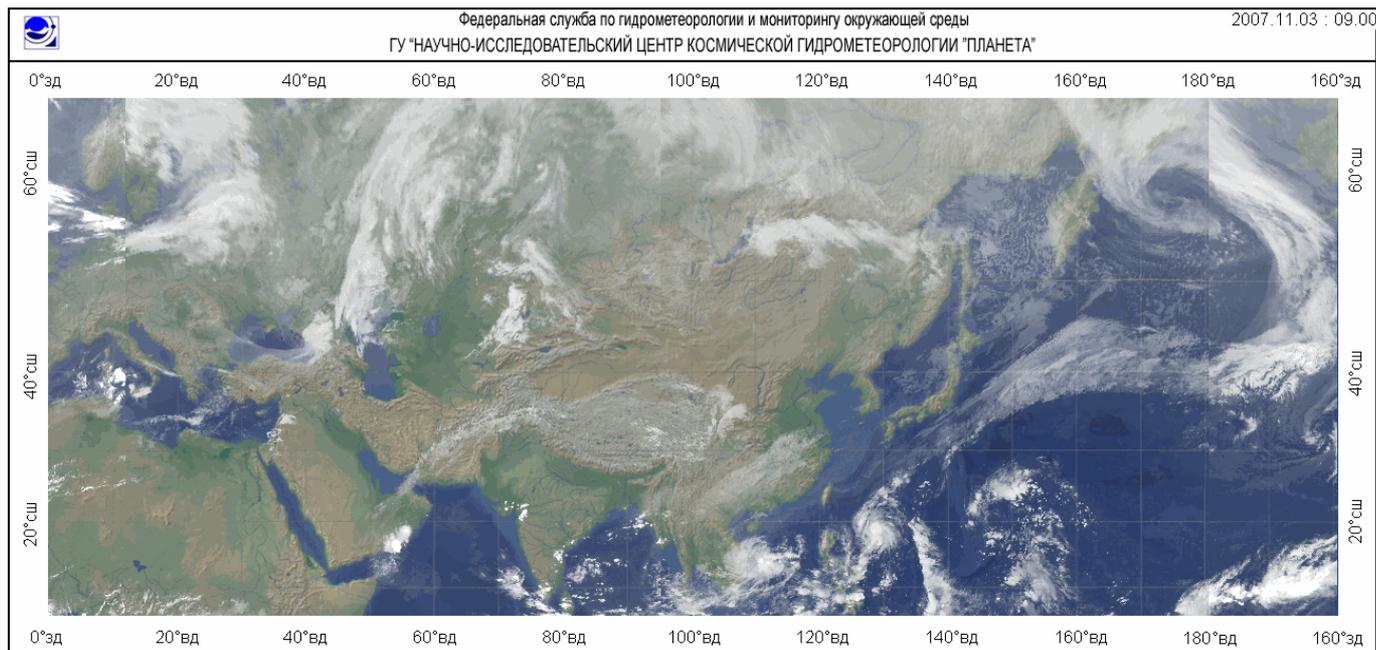
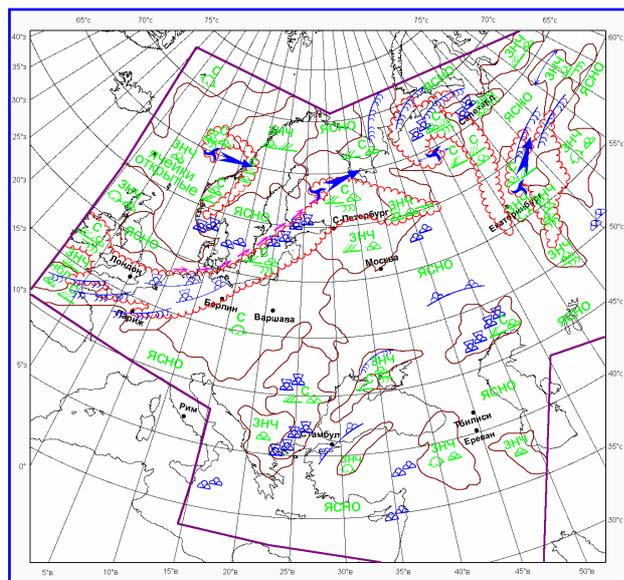
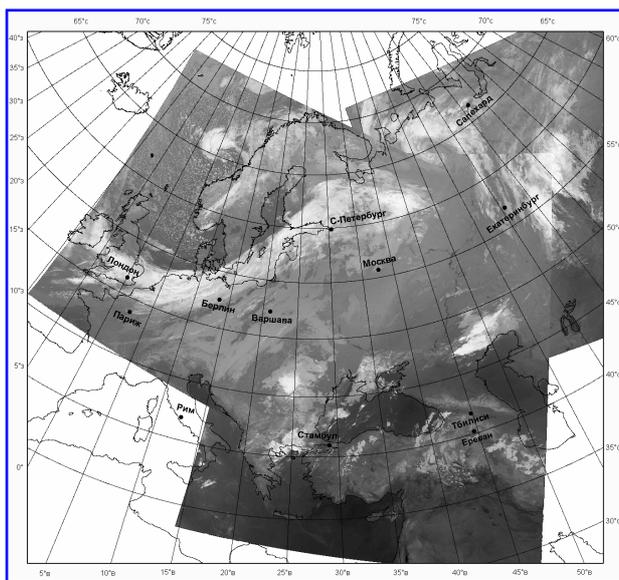


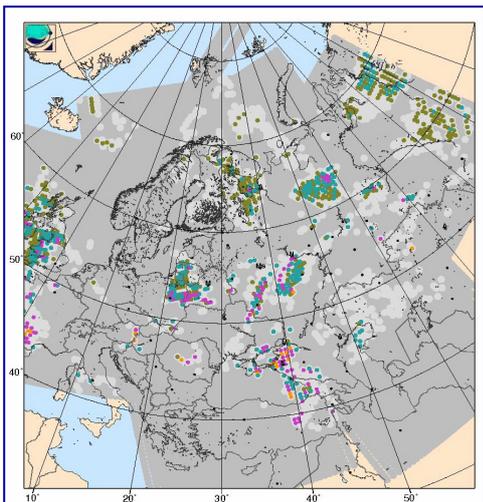
Рис. 3. Эволюция облачного покрова. Евразия
(по данным METEOSAT-9, METEOSAT-7, MTSAT-1R, GOES-10)



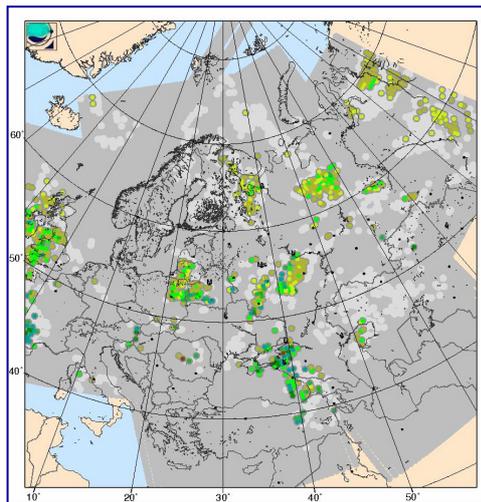
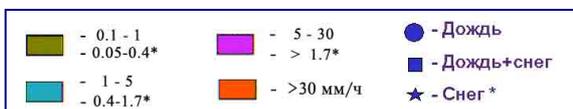
ИСЗ NOAA (AVHRR, 10,3-11,3 мкм) 02.09.2007 22:01 – 03.09.2007 01:25 СГВ

	слоистообразные облака		полосы кучевообразных облаков
	кучевообразные облака		полосы кучево-дождевых облаков
	слоисто-кучевообразные облака - ячейки закрытые		полосы перистообразных облаков
	перистообразные облака		отчетливые полосы облаков
	кучево-дождевые или мощные кучевые облака		ожидается разрушение облачного вихря
	НБЛ небольшая облачность		ожидается регенерация облачного вихря
	ЗНЧ значительная облачность		разрушающийся облачный вихрь остается малоподвижным
	С сплошная облачность		активная облачная зона с признаками циклогенеза
	границы главных облачных образований		с последующим образованием вихря
	границы облачных образований не относящихся к главным		зона активной облачности не связанная с циклогенезом (зона повышенной конвекции)
	граница снега		Т — участок фронтальной облачной полосы
	граница льда		Т+ — ожидается обострение фронтальной облачной полосы
	струйное течение		Т+ — ожидается разрушение фронтальной облачной полосы
	центр облачного вихря		Т- — малоподвижная фронтальная облачная полоса
	облачная спираль в виде запятой		Т- — направление смещения облачных образований
	фронтальная волна		Т- — локальное скопление кучево-дождевых облаков
	мезовихрь		Т- — локальное скопление кучевообразных облаков
	центр циклонической завихренности		

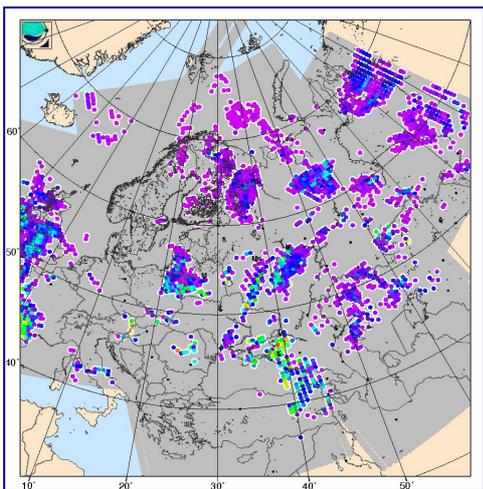
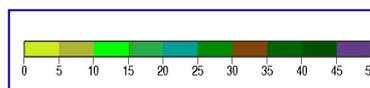
Рис. 4. Карта нефанализа



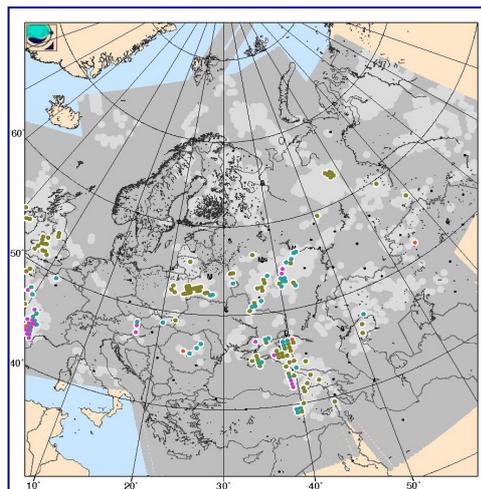
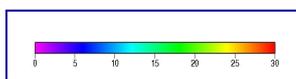
AMSU+AVHRR NOAA-16 19.06.2007 07:40...12:43 UTC
Средняя интенсивность и тип осадков



AMSU+AVHRR NOAA-18 19.06.2007 07:40...12:43 UTC
Максимальная интенсивность осадков (мм/ч)



AMSU+AVHRR NOAA-18 19.06.2007 07:40 ...12:43 UTC
Максимальная скорость восходящих движений (м/с)



AMSU+AVHRR NOAA-18 19.06.2007 07:40 ...12:43 UTC
Интенсивность гроз

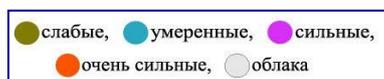


Рис. 5. Картирование параметров облачности и осадков: экспериментальные продукты

В ГУ «НИЦ «Планета» более 10 лет функционирует система получения в автоматическом режиме оперативных данных о вертикальных распределениях температуры и влажности атмосферы на стандартных изобарических поверхностях по измерениям спутниковых зондировщиков инфракрасного и микроволнового диапазонов АТОВС, установленных на спутниках серии NOAA. Система снабжена средств-

вами оперативного контроля качества данных атмосферного зондировщика.

Мониторинг ледового и снежного покровов

Тематические карты ледовой обстановки строятся в программной среде «PlanetaMeteo» по спутниковым данным видимого, инфракрасного или микроволнового диапазонов с привлечением данных наблюдений наземной гидрометеорологической сети.

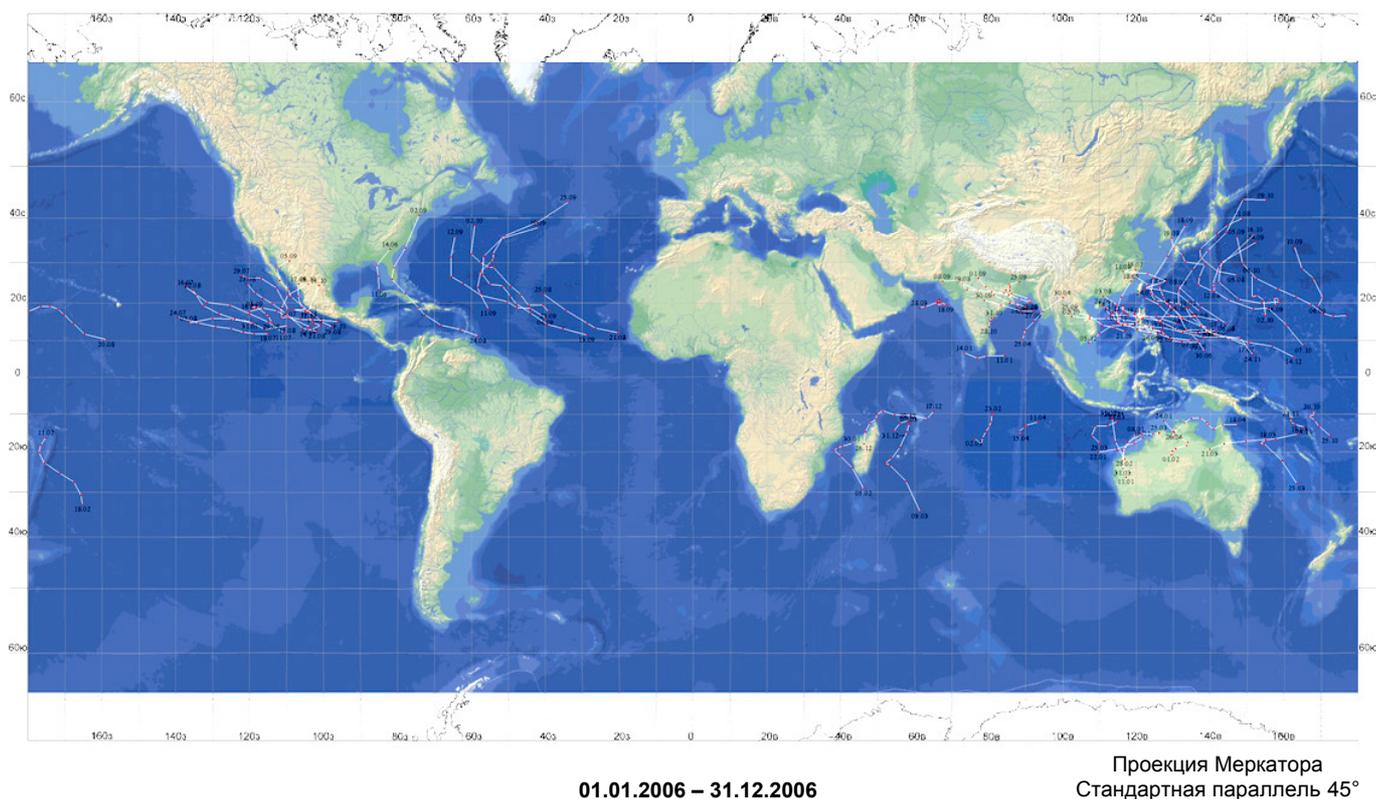


Рис. 6. Мониторинг тропических циклонов (скорость движения, время существования, пройденный путь, широта зарождения и разрушения циклонов)

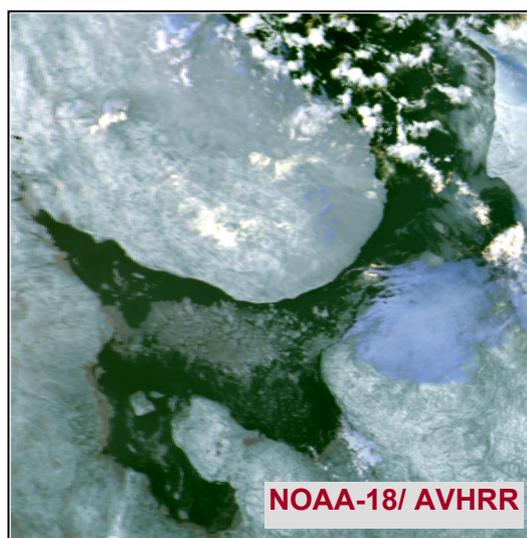
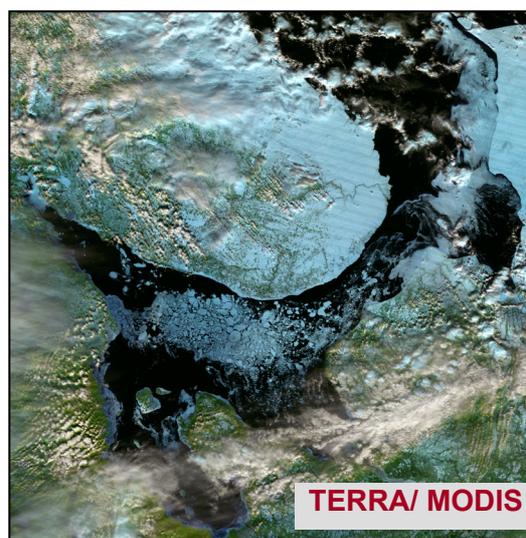


Рис. 7. Карта ледовой обстановки Белого моря. Цветосинтезированные изображения TERRA/MODIS и NOAA-18 (AVHRR) 04.04.2007

При частичном покрытии облачностью картографируемой территории производится комплексирование разновременных спутниковых изображений, в том числе данных различного пространственного разрешения.

На рис. 7 и 8 представлена карта ледовой обстановки для Белого моря, построенная интерактивно по данным AVHRR/NOAA и MODIS/EOS-TERRA. Детальные карты ледовой обстановки отдельных

акваторий строятся интерактивно с использованием снимков разного пространственного разрешения: грубого (~ 1 км, NOAA), среднего (250 м, MODIS) и высокого (~ 40 м, МСУ-Э, «Метеор»). Карты ледовой обстановки используются для обеспечения безопасности навигации в ледовых условиях, работ по освоению шельфа, проектирования и строительства портовых и транспортных сооружений и др.

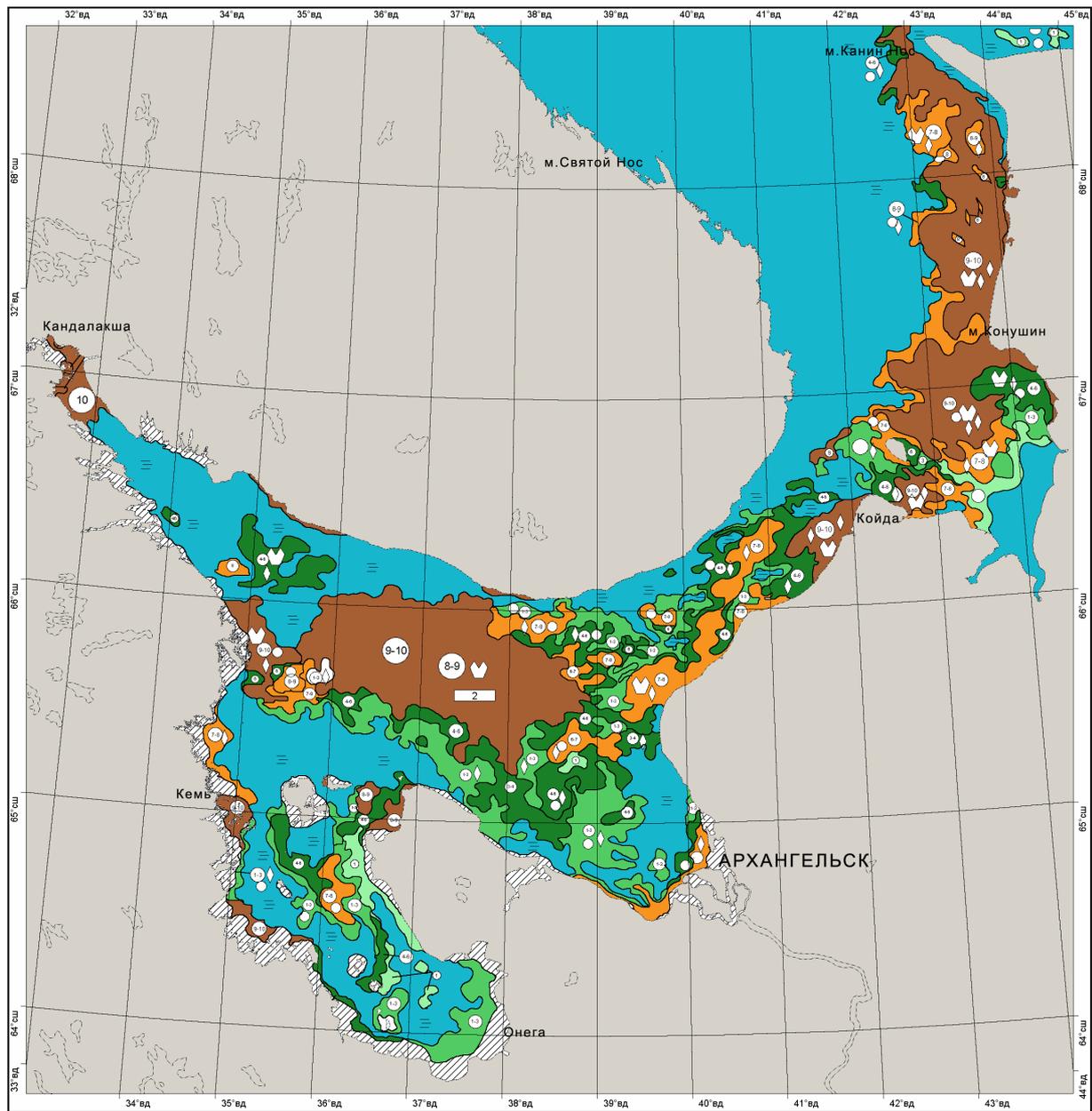


Рис. 8. Карта-схема ледовой обстановки в Белом море. Составлена по данным ИСЗ NOAA-18 (AVHRR) и TERRA (MODIS) 04.04.2007

Сплоченность дрейфующего льда по 10-бал шкале:

- чистая вода
- отдельные льдины (<1)
- редкий лед (1-3)
- разреженный лед (4-6)
- сплоченный лед (7-8)
- сплошной и очень сплоченный дрейфующий лед (9-10)
- припай

Формы плавучего льда:

- блинчатый лед
- тертый лед, ледяная каша (<2 м)
- мелкобитый лед (<20 м)
- крупнобитый лед (20-100 м)
- обломки ледяных полей (100-500 м)
- большие ледяные поля (500-2000 м)
- обширные ледяные поля (2 - 10 км)

Обобщенные характеристики льда:

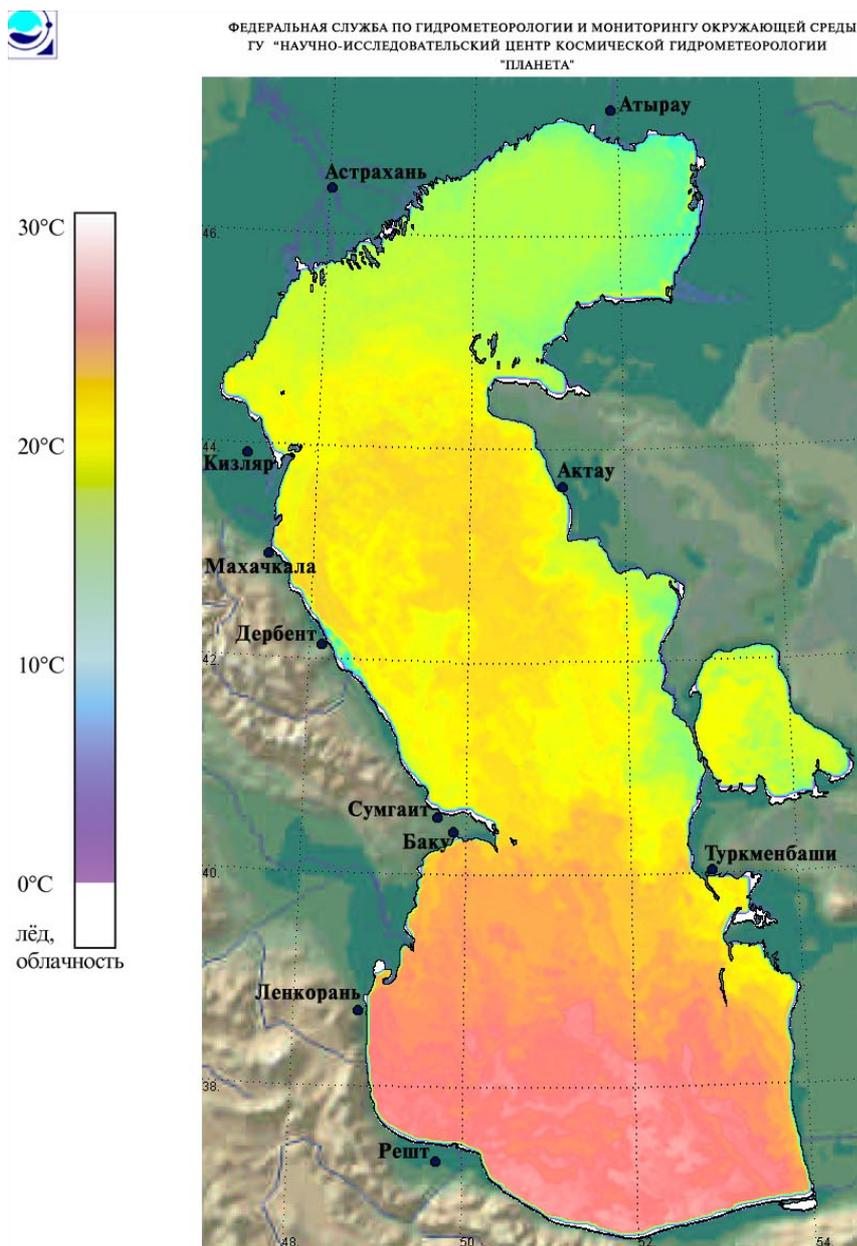
- 1-3 - сплоченность льда в баллах
- 3-4 - разрушенность льда (от 0 до 5 баллов)
- 40 - толщина припайного льда (см)
- 3 - торосистость льда (от 0 до 5 баллов)

Тематические карты границ распространения и загрязнения снежного покрова строятся интерактивно по данным измерений спутниковой аппаратуры в видимом диапазоне спектра. Карты изменения границ снежного покрова используются в агрометеорологии и климатологии снежного покрова.

Мониторинг водной среды

Карты температуры поверхности моря (ТПМ) регионального (рис. 9) и глобального покрытия строятся в автоматизированном режиме по данным поляр-

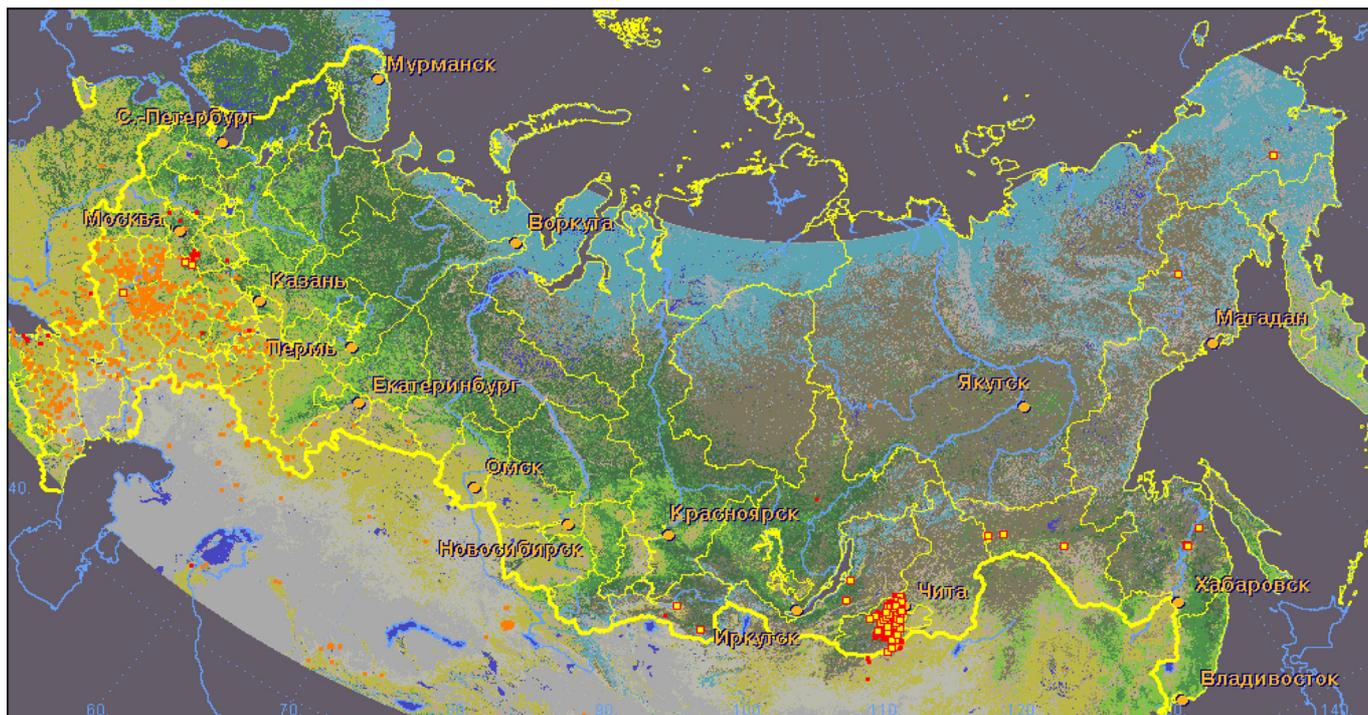
но-орбитальных КА NOAA и EOS-TERRA/AQUA, а также геостационарных спутников METEOSAT, GOES и MTSAT. В технологии построения карт ТПМ реализованы процедуры детектирования облачности, коррекции абсолютной калибровки измерений в ИК каналах, а также учет атмосферного ослабления ИК-излучения с использованием численного решения уравнения переноса ИК-излучения для безоблачной атмосферы и априорных данных о метеорологических параметрах [2, 4].



Температура поверхности Каспийского моря

NOAA 18	30.09.2007	22:12	NOAA 18	01.10.2007	23:43
NOAA 18	30.09.2007	23:53	NOAA 18	02.10.2007	09:36
NOAA 18	01.10.2007	08:08	NOAA 18	02.10.2007	21:52
NOAA 18	01.10.2007	09:46	NOAA 18	02.10.2007	23:32
NOAA 18	01.10.2007	22:03	NOAA 18	03.10.2007	09:26

Рис. 9. Температура поверхности Каспийского моря (по данным AVHRR)



ИСЗ NOAA, TERRA, AQUA, 14.08.2007

Евразия

- -горячие пятна, детектированные по спутниковым данным (лесные территории)
- -горячие пятна, детектированные по спутниковым данным (нелесные территории)
- -области горения, детектированные по спутниковым данным
- -крупные пожары по данным Службы Авиалесоохраны
- -границы регионов

Рис. 10. Обзорная карта пожарной обстановки

Тематические карты состояния и загрязнения водной среды строятся в программной среде «PlanetaMeteo» по спутниковым данным видимого, инфракрасного или микроволнового диапазонов. В программной среде, поддерживающей данную технологию, содержится инструментарий для интерактивного нанесения на тематическую карту динамических структур (положение морских течений, прибрежных антициклонических вихрей, циклонических вихрей, вихревых диполей и т.д.) и параметров загрязнения водной среды (зон взмученных вод речного стока, нефтяных пленок и др.). С использованием данной технологии осуществляется построение ежедневных карт циркуляции и параметров загрязнения вод, а также обобщенных за декаду карт-схем состояния и загрязнения водной среды [5].

Мониторинг растительного покрова

Тематические карты растительного покрова строятся по данным AVHRR/NOAA и MODIS/EOS-TERRA. В технологии реализованы процедура уточнения абсолютной калибровки для каналов видимого и ближнего ИК диапазонов, а также расчет средних значений (за 5 или большее количество суток) вегетационного индекса по всей территории России и каждому субъекту Российской Федерации.

Мониторинг пожарной обстановки

Для мониторинга пожаров по территории России в ГУ «НИЦ «Планета» совместно с ИКИ РАН создана специальная технология, использующая данные ИСЗ NOAA и EOS-TERRA/AQUA. По данной технологии осуществляется построение тематических карт очагов пожаров и дымовых шлейфов в пожароопасный период по территории России (см. рис. 10) и отдельным регионам. Для детектирования очагов пожаров используются пороговые методы выделения «горячих точек» на изображениях в спектральном диапазоне 3,9 мкм. Для обнаружения дымовых шлейфов используются визуальные методы дешифрирования изображений видимого диапазона спектра.

Мониторинг наводнений

Тематические карты затопления территорий в периоды паводков и половодий строятся по многозональным спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения в видимом диапазоне. При определении затопленных и незатопленных площадей используются кластерные методы обработки одноканальных и многозональных спутниковых изображений.

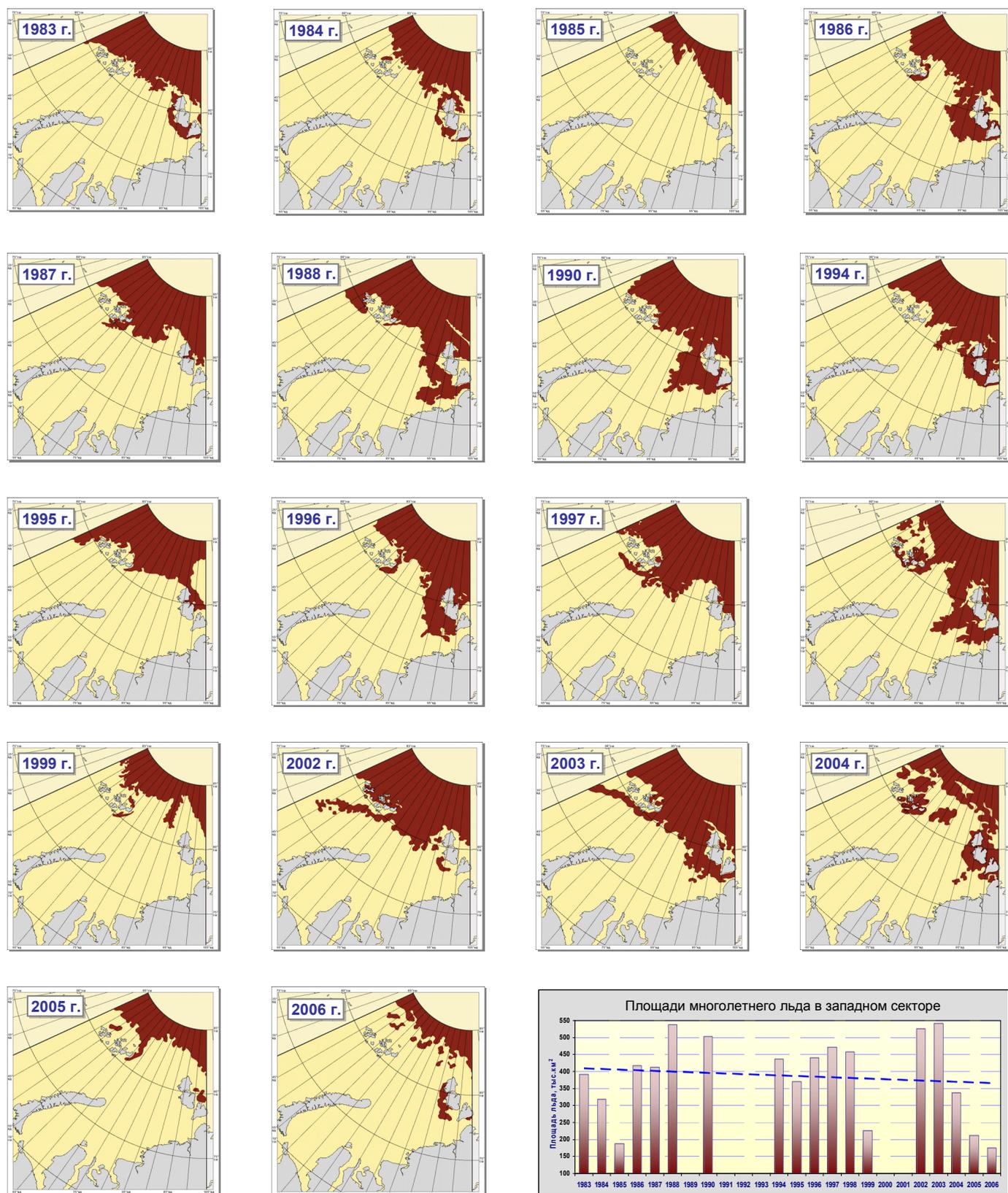


Рис. 11. Межгодовые изменения площади многолетнего льда в Западном секторе Арктики (по данным ИСЗ ОКЕАН, РЛС БО, разрешение 1,5 – 2 км, декабрь 1983 г.–1999 г. и ИСЗ QuikSCAT, Sea Wind NRT, разрешение 35–40 км, декабрь 2002 г.–2006 г.)

Использование рядов спутниковых данных для изучения долговременных изменений окружающей среды, включая региональные климатические изменения

Для анализа долговременных изменений окружающей среды необходимо наличие многолетних рядов спутниковых данных, обеспечение их непрерывности, а также радиометрической и геометрической совместимости. В ГУ «НИЦ «Планета» ведется архив спутниковых данных, который является разделом Госфонда РФ спутниковой информации (поддерживается на регулярной основе с 1979 г.). Данные архива Госфонда РФ являются основой для изучения долговременных изменений окружающей среды.

Показательный пример исследований региональных изменений - мониторинг границы многолетнего льда в Западной Арктике по данным радиолокационной съемки (по измерениям радиолокационной станции бокового обзора ИСЗ серии Океан, 1983-1999 гг. и данных скаттерометра QuikSCAT, 2002-2006 гг.). За истекший период по указанным данным были построены и верифицированы карты-схемы распространения однолетнего и многолетнего льда в западном секторе Арктики [3, 6]. На рис. 11 дана последовательность (временной ряд) карт ледяного покрова 1983-1988, 1994-1999, 2002-2006 гг., где усматривается небольшой отрицательный тренд в оценке площади многолетнего льда.

Другой пример изучения региональных климатических изменений - спутниковый мониторинг опустынивания для региона Калмыкии (Черные земли). Построены долговременные ряды - карты почвенно-растительного покрова (период 1991-2007) и диаграмма изменения площади песков.

В заключение следует упомянуть перспективные разработки - создание методов получения количественных данных о концентрациях малых газовых составляющих атмосферы (в том числе парниковых газов) по измерениям спутниковых ИК зондировщиков высокого спектрального разрешения. Речь идет, прежде всего, о получении оценок общего содержания (ОС) метана, закиси азота, оксида углерода по данным ИК зондировщиков IASI/MetOp, AIRS/Aqua. Исследования по этой тематике велись в течение ряда лет в нашем центре совместно с РНЦ «Курчатовский Институт» при поддержке Евметсат и ЕКА. Получены удовлетворительные по точности оценки данных о концентрациях малых газовых составляющих атмосферы. Планируется адаптация

методов, разработанных для приборов IASI и AIRS, к информации перспективного ИК зондировщика ИКФС-2 (должен быть установлен на КА «Метеор-М» №2).

Более сложной, но и более важной является задача детектирования вариаций концентрации или ОС основного парникового газа - диоксида углерода (CO₂), учитывая его роль в углеродном цикле и энергетическом балансе Земли. ГУ «НИЦ «Планета» совместно с рядом других исследовательских центров выполнены исследования по созданию методов оценки вариаций CO₂ над бореальными лесами Сибири по данным ИК зондировщика AIRS/Aqua. Результаты валидации предложенного метода показывают, что спутниковые оценки ОС CO₂ качественно верно отражают сезонный ход (убывание в летний период из-за фотосинтеза) [7]. В настоящее время эти исследования продолжаются.

Литература

1. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации // Труды НИЦ «Планета» / В.В. Асмус, В.Н. Дядюченко, В.А. Загребав [и др.]. - 2005. - Вып.1(46). - С. 3-21.
2. Справочник потребителя спутниковой информации // Под редакцией В.В.Асмуса и О.Е.Милехина. - СПб.: Гидрометеиздат, 2005. - 114 стр.
3. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003 - 2007 гг. // Метеорология и гидрология / А.И. Бедрицкий, В.В. Асмус, В.А. Кровотынцев [и др.]. - 2007. - №11. - С. 5-13.
4. Использование радиолокационных данных ИСЗ серии Океан для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса / В.В. Асмус, О.Е. Милехин, В.А. Кровотынцев [и др.]. - 2002. - №3. - С. 63-70.
5. Исследование многолетней динамики морского льда в Арктике по спутниковым радиолокационным данным // Труды НИЦ «Планета» / В.В. Асмус, В.А. Кровотынцев, О.Е. Милехин [и др.]. - 2005. - Вып.1(46). - С. 155-172.
6. Методическое и программное обеспечение глобального и регионального мониторинга температуры водных поверхностей по данным полярно-орбитальных и геостационарных ИСЗ // Труды НИЦ «Планета» / В.И. Соловьев, Л.А. Анеева, И.С. Соловьева [и др.]. - 2005. - Вып.1(46). - С. 129 - 154.
7. Успенский А.Б. Детектирование тропосферных вариаций CO₂ по данным спутникового ИК зондировщика высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса / А.Б. Успенский, А.В. Кухарский, А.Н. Рублев. - 2006. - №4. - С.42-54.