

Система формирования и анализа многолетних рядов региональных климатически значимых параметров по спутниковым данным

**А.М. Алферов, З.В. Андреева, М.В. Бухаров, О.Н. Григорьева, Н.П. Иванова,
В.А. Кровотынцев, Н.Д. Тилинина, И.С. Тренина.**

*Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
123242 Москва, Большой Предтеченский пер., 7
E-mail: krv@planet.iitp.ru*

Дано краткое описание разработанной в ГУ «НИЦ «Планета» экспериментальной информационной системы обработки спутниковых данных для формирования, накопления и анализа многолетних рядов характеристик окружающей природной среды (растительного, снежного и ледяного покровов), обеспечивающих мониторинг и оценку климатической изменчивости важнейших регионов России. Приведены примеры полученных рядов и методологии их сопряженного анализа для южного региона России.

Ключевые слова: региональная климатическая изменчивость, спутниковый мониторинг, спутниковая информационная продукция, специализированные цифровые архивы, технология формирования и анализа рядов климатических данных.

Введение

Создание специализированных архивов многолетних рядов однородных наблюдений за состоянием объектов природной среды по спутниковой информации является необходимым условием для обеспечения мониторинга и оценки климатической изменчивости для территорий важнейших регионов России.

В ГУ «НИЦ «Планета» разработана и реализована экспериментальная информационная система (на основе модернизации базовых технологий обработки спутниковых данных ГУ «НИЦ «Планета» [1, 2]) формирования и поддержки многолетних однородных рядов климатически значимых характеристик растительного, снежного и ледяного покровов с использованием оперативной и архивной информации с отечественных и зарубежных спутников, данных наземных измерений.

Разработанная технология апробирована в 2008-2009 гг. на примере проведения спутникового эколого-климатического мониторинга для нескольких природных объектов Южного федерального округа (ЮФО). В качестве климатически значимых показателей использовались следующие характеристики:

- площади припая и плавучего льда северной части Каспийского моря;
- площади покрытия территории ЮФО сплошным и сухим снежным покровом;
- площади, занятые песками на территории одного из самых крупных очагов опустынивания России – Черных землях Республики Калмыкия;

- средние значения вегетационного индекса фиксированной территории Республики Калмыкия;
- средние значения температуры морской поверхности (ТПМ) Северного Каспия.

Методы и подходы, использованные при разработке системы формирования и анализа рядов климатически значимых характеристик по спутниковым данным

Ключевой проблемой создания однородных многолетних рядов климатически значимых характеристик растительного, снежного и ледового покровов является обеспечение совместимости разнородной (по спектральным диапазонам, пространственному и радиометрическому разрешению) спутниковой информации, полученной с использованием различных космических систем, в том числе и устаревших, функционировавших более 20 лет назад.

Особенности выбранного подхода для решения данной проблемы состоят в следующем:

- каждый вид спутниковой информации обрабатывается по своей методике до получения климатически значимой характеристики соответствующего земного покрова, а совместимость результатов обработки обеспечивается на уровне выходной информационной продукции;
- выбираются характеристики, отражающие состояние объектов, имеющих большие площадные размеры и наиболее репрезентативные для выбранной физико-географической зоны;
- одновременное использование площадных характеристик (снежного, ледяного и растительного покровов, температуры морской поверхности), сглаживающих мелкие локальные процессы, упрощает анализ и оценку закономерностей регионального проявления глобальных изменений термического режима и циркуляции атмосферы, позволяет выявить объекты наиболее чувствительные к изменениям климата.

Основу экспериментальной системы формирования и анализа рядов климатически значимых характеристик составляют базовые и ряд новых технологий ГУ «НИЦ «Планета», которые с использованием оперативной и архивной спутниковой природно-ресурсной и океанографической информации Госфонда РФ, картографических материалов и данных наземных обследований обеспечивают следующие основные виды обработки:

- географическая привязка снимков по орбитальным данным с возможностью нанесения сетки (нормализация);
- географическая привязка снимков по опорным точкам местности;
- трансформация и выдача изображений в требуемых картографических проекциях и форматах;

- создание мозаик снимков, покрывающих заданную территорию, с преобразованием в заданную проекцию;
- проведение автоматизированного распознавания (без обучения и с обучением) природных объектов по многозональным спутниковым изображениям;
- проведение автоматизированной и интерактивной (с привлечением тестовой информации) тематической обработки изображений и дешифрирование объектов естественного и искусственного происхождения; создание тематических карт;
- расчет количественных характеристик морской среды;
- анализ изменений по разновременным снимкам одной и той же территории.

Основу методологии мониторинга ледового покрова составляет базовая технология построения оперативных карт ледовой обстановки в Каспийском море, используемая в ГУ «НИЦ «Планета» в рамках оперативной деятельности [3, 4]. В качестве исходной информации используются данные каналов 1 (0,58-0,68 мкм), 2 (0,725-1,00 мкм) и 4 (10,3-11,3 мкм) спектрометра AVHRR ИСЗ NOAA, а также комбинации каналов 1 (0,62-0,67 мкм), 4 (0,545-0,565 мкм) и 3 (0,459-0,479 мкм) спектрорадиометра MODIS ИСЗ серии EOS (TERRA и AQUA).

Построение оперативных карт ледовой обстановки осуществляется в среде многофункциональной программной системы обработки спутниковых данных ГУ «НИЦ «Планета» на основе методов интерактивного дешифрирования. В среде заложены: широкий набор инструментов для проведения интерактивного дешифрирования; база данных условных обозначений в соответствии с требованиями как внутриведомственными (Росгидромет), так и международными (ВМО); сервисные функции, используемые для оформления выходной информационной продукции. В состав основных процедур интерактивного дешифрирования входят: оконтуривание ледяных образований на космических изображениях; цветовая заливка оконтуренных объектов плавучего льда по преобладающему возрасту или сплоченности; штриховка зон припая; нанесение условных обозначений (возраст, сплоченность, формы льда, обобщенные характеристики и др.); формирование легенды с учетом особенностей каждой карты-схемы ледовой обстановки. При построении оперативных карт ледовой обстановки привлекаются дополнительные сведения, полученные на основе анализа: ледовой обстановки по материалам космической съемки в предшествующий период; данных наземных наблюдений о гидрометеорологической ситуации и толщине льда в исследуемом районе на кануне проведения космической съемки.

Выходная информационная продукция представляется в виде карт границ распространения и площадей покрытия замерзающей акватории Каспийского моря припаем

и плавучим льдом, т.е. карт, имеющих всего три градации: припай, плавучий лед и свободная от льда водная поверхность. В целях обеспечения непрерывности рядов спутниковых данных (этот фактор в данном случае является основополагающим), в качестве элемента временного (сезонного или многолетнего) ряда может быть использован любой вид информации с различных космических аппаратов, независимо от его спектральной принадлежности. При этом совместимость параметров ледяного покрова достигается на уровне готовых тематических карт.

В качестве минимального периода картирования параметров ледяного покрова принята декада, поэтому все характеристики ледяных полей, дешифрированные с разновременных спутниковых изображений, приводятся к середине декады, в случае месячной дискретности – к середине месяца. С этой целью перед оконтуриванием границ припая

и плавучего льда производится учет скорости смещения границ по нескольким разновременным спутниковым изображениям, полученным в течение декады или месяца.

Ряд, характеризующий сезонные изменения ледяного покрова, сформирован на основе декадных тематических карт границ припая и плавучего льда, полученных по данным МСУ-Э ИСЗ МЕТЕОР-3М, AVHRR ИСЗ NOAA и MODIS ИСЗ TERRA/AQUA за зимние периоды 2004/2005 - 2008/2009 гг. Ряд, характеризующий межгодовую изменчивость ледяного покрова, сформирован на основе тематических карт границ припая и плавучего льда за период 1987-2009 гг., полученных с использованием архивных данных AVHRR ИСЗ NOAA, РЛС БО ИСЗ ОКЕАН и МСУ-СК ИСЗ РЕСУРС, принятых на момент максимальной ледовитости в Каспийском море, наблюдаемой обычно в 1-й, 2-й или 3-й декадах февраля, в зависимости от развития ледовой обстановки.

Основу методологии формирования рядов тематических карт распространения (сплошного и сухого) снежного покрова в пределах административных границ Южного федерального округа составили два архива карт границ снежного покрова, построенных в ГУ «НИЦ «Планета» на основе ежесуточно проводимой тематической обработки информации, принимаемой с ИСЗ NOAA [5]. Для контроля метеорологических параметров дополнительно к фактической и прогностической информации используются данные геостационарного спутника Meteosat. Архивы содержат следующие виды карт:

- карты границ сплошного снежного покрова (где покрытие снегом составляет более 50% поверхности), построенные в период с 2003 по 2009 год по методике визуального (экспертного) дешифрирования данных видимого и ИК-диапазона (0,58-0,68; 0,725-1,00; 3,55-3,93 мкм) аппаратуры AVHRR;

- карты границ сухого и тающего снежного покрова, построенные в период с 2005 по 2009 год по многоспектральной информации микроволнового радиометра AMSU-A с пространственным разрешением около 45 км (учитываются спектральные каналы 23,8; 31,4; 50,3 и 89,0 ГГц) с помощью разработанной в ГУ «НИЦ «Планета» методики автоматизированного распознавания следующих типов снежного покрова: сплошной сухой (при температуре воздуха ниже 0°C); медленно тающий (при температуре воздуха от +1 до +4°C) сплошной или лежащий местами снежный покров; быстро тающий (при температуре воздуха не менее +5°C) снежный покров.

Технология формирования многолетних рядов спутниковой информационной продукции, отражающей процессы опустынивания, включает [6]:

- составление тематических карт почвенно-растительного покрова по территории Черных земель Республики Калмыкия с выделением площадей, занятых песками и деградированными почвами, методами распознавания и классификации многозональных спутниковых изображений без обучения (кластерный анализ) и с обучением (по тестовым участкам и с использованием гидротермического коэффициента увлажненности по данным метеорологических станций Утта, Яшкуль, Артезиан);

- получение цифровых карт распределения вегетационного индекса NDVI для территории Республики Калмыкии, диаграмм сезонной и межгодовой изменчивости значений вегетационного индекса, осредненных за 5 суток.

Использовалась космическая информация (за период 1991-2009 гг.) по территории Черных земель из архива Госфонда РФ по данным сканеров МСУ-СК ИСЗ РЕСУРС и спектрорадиометров MODIS ИСЗ TERRA/ AQUA, полученных в мае-июне, когда на изображениях засушливых территорий еще заметны достаточные контрасты.

Технология формирования массивов данных по температуре морской поверхности Северного Каспия основана на использовании данных ИК-каналов радиометра MODIS ИСЗ AQUA с разрешением 4 км за период с июля 2002 г. по декабрь 2009 г. Специально разработанные для этих целей в ГУ «НИЦ «Планета» программные методы включают дешифровку формата, в котором поставляются спутниковые данные, выборку измерений ТПМ для свободных от облачности участков акватории и построение средних за 8 дней значений ТПМ для всей акватории Северного Каспия. Дополнительно разработан программный модуль визуализации полученных результатов в виде диаграмм, обеспечивающий комплексный анализ межгодовой и сезонной динамики аномалий ТПМ и их связи с динамикой снежного, ледового и растительного покровов ЮФО.

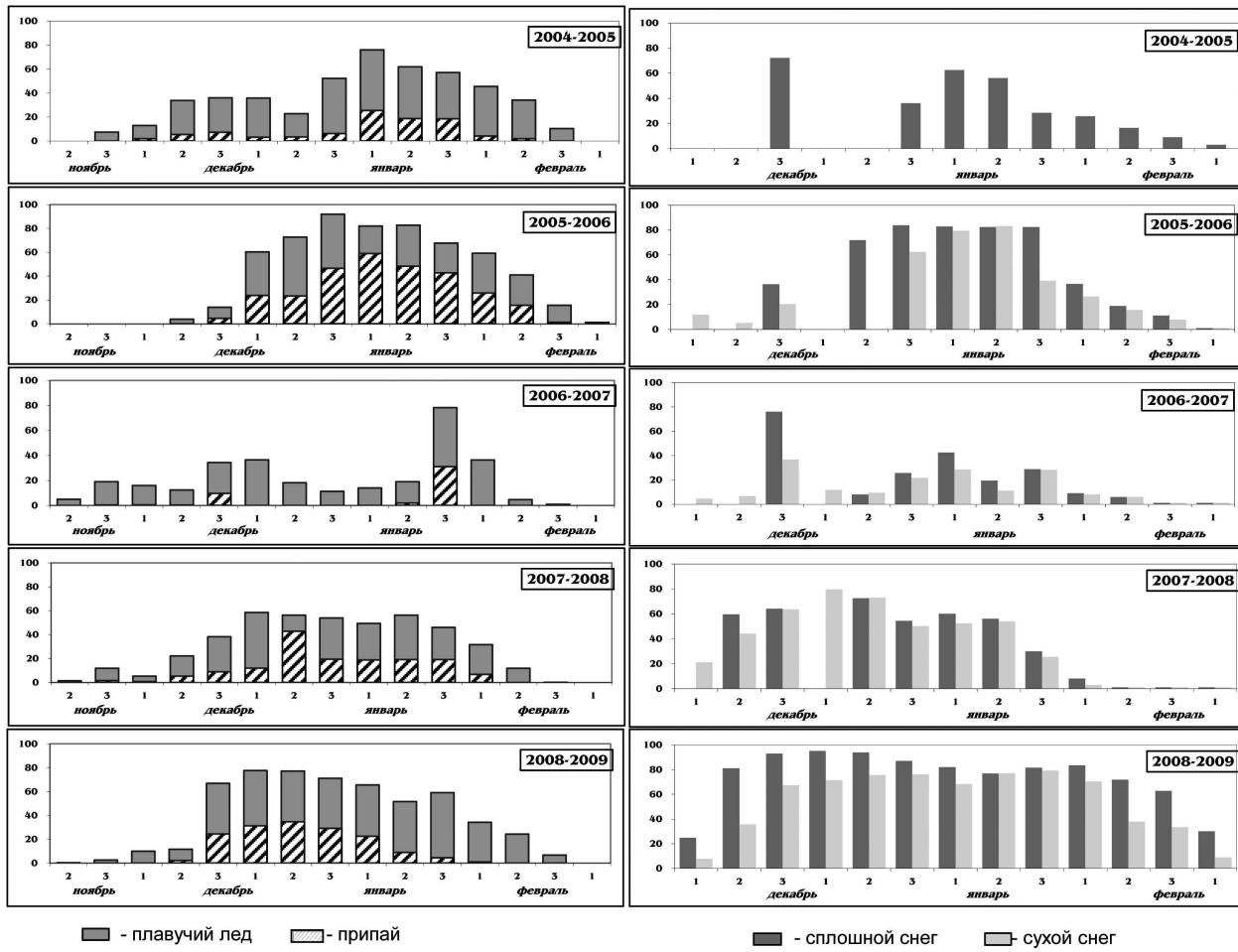


Рис.1. Сопряженный анализ сезонных изменений площади льда в Каспийском море (а) и площади снежного покрова в Южном Федеральном округе (б) в зимние периоды 2004/2005 – 2008/2009 гг

Оценка результатов

На основе обработки спутниковой информации и данных наземных гидрометеорологических измерений построены и сформированы:

- ранжированные по датам, последовательности тематических карт границ распространения и площадей покрытия припая и плавучего льда в замерзающей акватории Каспийского моря за период с 1987 по 2009 г.;
- тематические карты границ распространения (сплошного и сухого) снежного покрова в пределах ЮФО за период 2004-2009 гг. (для сухого 2006-2009 гг.);
- временная последовательность однородных многолетних рядов спутниковых изображений по территории Черных земель Республики Калмыкия и тематических карт почвенно-растительного покрова (с выделением песков и деградированных почв в виде отдельных классов), отражающих развитие процессов опустынивания за период 1991-2009 гг.;
- ряд цифровых карт распределения вегетационного индекса NDVI для территории Республики Калмыкия за период 2001-2009 гг. и диаграммы сезонной и межгодовой из-

менчивости осредненных за 5 суток по территории Калмыкии значений вегетационного индекса;

- массивы данных по температуре морской поверхности Северного Каспия и диаграммы сезонной и межгодовой изменчивости средних значений ТПМ за период 2002-2009 гг.

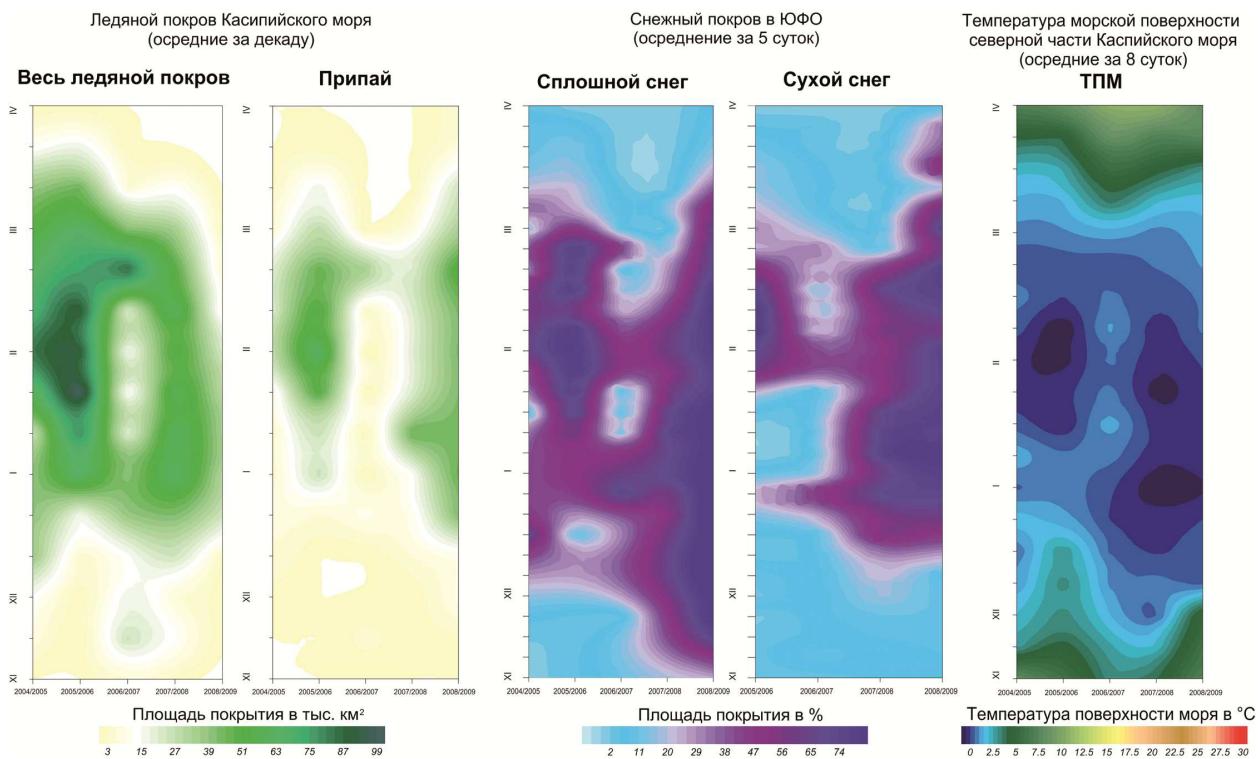


Рис.2. Диаграммы сезонной и межсезонной изменчивости характеристик окружающей природной среды Южного Федерального округа (ЮФО) в зимний период, полученные на основе обработки спутниковых данных

Создан специализированный архив, ориентированный на размещение и использование информационной продукции, предназначеннной для диагностики региональных климатических изменений по выбранным объектам ЮФО. Данные этого архива выставляются на сайтах ГУ «НИЦ «Планета» (<http://planet.iitp.ru>) и Северо-Евразийского климатического центра (<http://seakc.meteoinfo.ru>, <http://neacc.meteoinfo.ru>).

Данные специализированного архива позволяют проводить сопряженный анализ полученных рядов характеристик растительного, снежного и ледяного покровов, температуры поверхности Каспийского моря, уточнять параметры межгодовой и сезонной динамики соответствующих характеристик (рис. 1, 2), исследовать их связи с основными синоптическими процессами и соответствие с индексами макромасштабной циркуляции атмосферы. С помощью карт полей давления, максимальной скорости и направления ветра у земной поверхности (выпускаемых в ГУ «НИЦ «Планета») проанализированы синоптиче-

ские процессы над ЕТР, формирующие преобладание затоков на территории ЮФО холодных, либо теплых воздушных масс и определяющие соответствующие изменения площадных характеристик снежного и ледяного покровов. Для зимних периодов 2004-2009 гг. выявлено наличие хорошо выраженной связи между площадными характеристиками снежного и ледяного покровов с индексом североатлантического колебания для зимнего периода NAO(D-M) (рис. 3). Для зимних периодов 1987-2009 гг. выявлена связь максимальных площадей ледяного покрова с индексом N-S асимметрии солнечной активности (рис. 4).

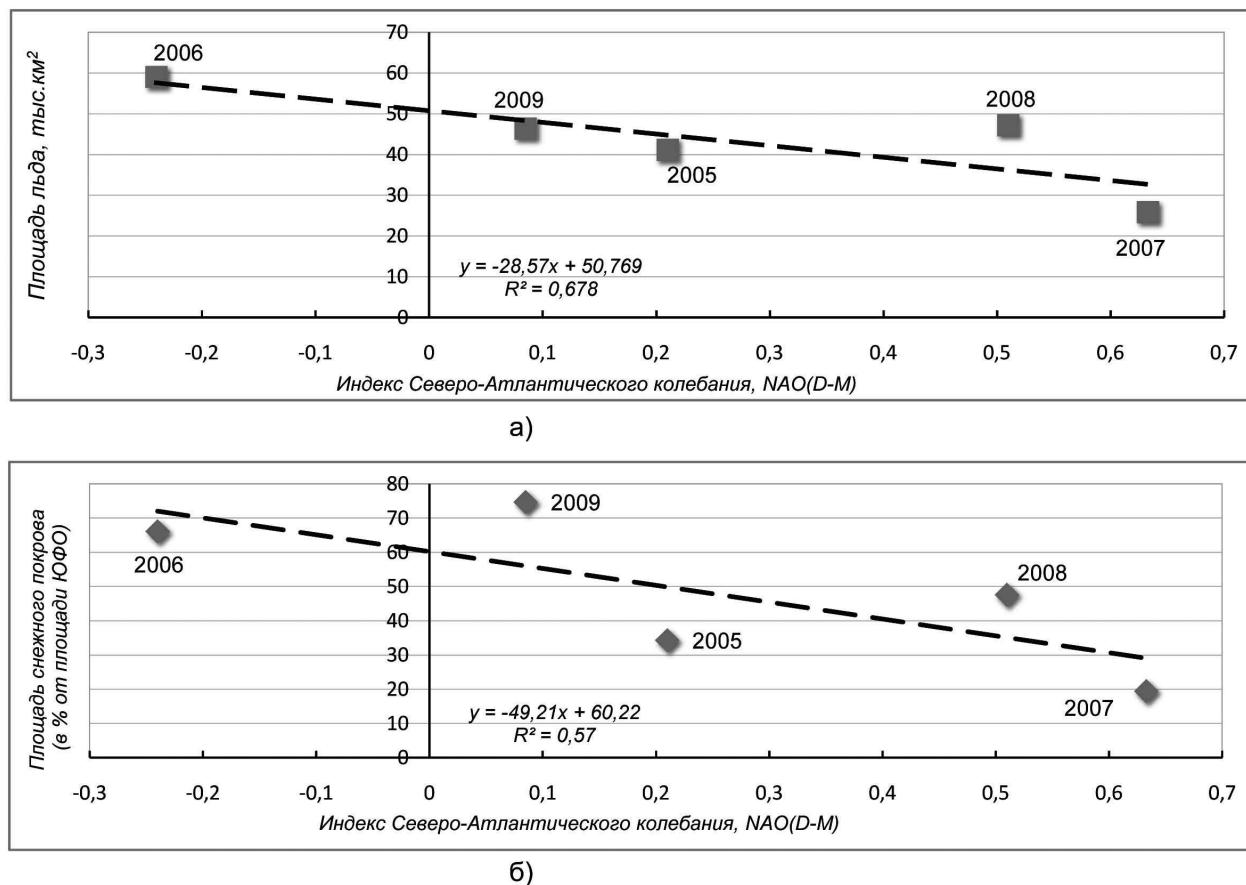


Рис.3. Межгодовая изменчивость средних площадей ледяного покрова Северного Каспия (а) и снежного покрова ЮФО (б) в зимние периоды 2005-2009 гг. в сопоставлении с индексами крупномасштабной циркуляции атмосферы в Северном полушарии. Использованы индексы (Northern Hemisphere Teleconnection Patterns), вычисляемые Центром прогнозов климата NOAA на основе данных реанализа NCEP/NCAR о колебаниях поля геопотенциала внетропической зоны Северного полушария на уровне AT₇₀₀ (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc>)

Результаты анализа сформированных рядов показали, что предложенная спутниковая информационная система формирования и поддержки многолетних рядов климатически значимых характеристик, благодаря получению разнообразных пространственно-временных характеристик (например, определение сроков начала и окончание снежного и ледового сезонов в различных пунктах региона, общей площади, занятой снеж-

ным и ледяным покровом в различные времена сезона, общей продолжительности снежного и ледового сезона и др.), дает возможность исследовать полученные ряды в сочетании с ретроспективным анализом данных других доступных каталогов климатических данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 08-07-13540 офи-ц.

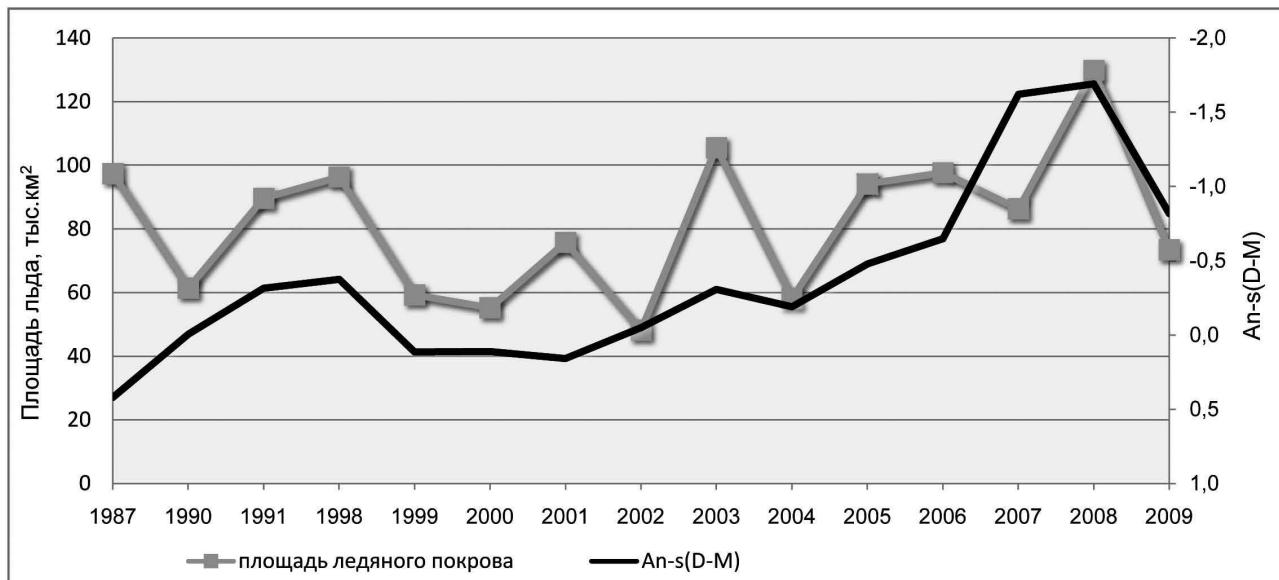


Рис.4. Межгодовая изменчивость максимальных за зимний период площадей ледяного покрова Северного Каспия (припая и дрейфующего льда) в сопоставлении с индексом An-s(D-M) за период 1987-2009 гг. Индексы северо-южной асимметрии пятнообразования на Солнце An-s(D-M) рассчитаны по данным архива NASA/Marshall Flight Center, Solar Physics – Royal Greenwich Observatory – USAF/NOAA SAnsot Data (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>)

Список литературы

1. Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребаев В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации // Тр. НИЦ «Планета». – 2005. – Вып.1 (46). – С. 3-21.
2. Справочник потребителя спутниковой информации. / Под ред. В.В. Асмуса, О.Е. Милехина. - С-Пб.: Гидрометеоиздат, 2005. 114 с.
3. Фролов А.В., Асмус В.В., Кровотынцев В.А. и др. Комплексные исследования гидрометеорологической и ледовой обстановки в северо-западной части шельфа Каспийского моря на основе данных спутниковых и экспедиционных наблюдений и модельных расчетов. Метеорология и гидрология, 2009. №3. С. 20-34.
4. Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Тренина И.С. Технологии обработки и архивации спутниковых данных при проведении мониторинга ледяного покрова Антарктики / Тезисы докладов на научной конференции «Россия в Антарктике». С-Пб, ГУ ААНИИ, 12-14 апреля 2006 г. С. 34 – 35.

5. Бухаров М.В., Геохланян Т.Х., Соловьев В.И. Распознавание типов снежного и ледового покровов по микроволновым измерениям со спутника NOAA. – Метеорология и гидрология, 2003. № 11. С. 54-63.
6. Григорьева О.Н., Елисеев Н.В., Иванова Н.П., Кровотынцев В.А. Технология мониторинга процессов опустынивания на основе спутниковых данных // Тр. НИЦ «Планета». – 2005. – Вып.1 (46). – С. 187-195.

Long-term climatic significant data set creation and analysis system based on satellite data

**A.M. Alferov, Z.V. Andreeva, M.V. Buharov, O.N. Grigorjeva, N.P. Ivanova,
V.A. Krovotyntsev, N.D. Tilinina, I.S. Trenina**

*State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”
123242 Moscow, 7 Bolshoy Predtechensky st.
E-mail: krv@planet.iitp.ru*

The short description of the satellite data processing system developed in SRC “Planeta” is given. The experimental system has been developed for a long-term climatic significant data set (vegetation, snow and ice covers characteristics) creation and analysis, which provide monitoring and climatic variability estimation of the major Russian regions. The examples of the data records and the conjugated analysis methodology of the referred characteristics for the South Federal District of Russian Federation are given.

Keywords: region climatic variability, satellite monitoring, satellite information production, specialized digital archives, climatic data set creation and analysis technology.