

EDN: ZCJMUS

УДК 528.8

Perspective for Global and Regional Monitoring of Phytopigment Dynamics in the Ocean and Land by Earth Remote Sensing

Anatoly P. Shevyrnogov,
Galina S. Vysotskaya, Tamara I. Pisman,
Natalia A. Kononova* and Irina Yu. Botvich
*Institute of Biophysics SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 03.11.2022, received in revised form 25.11.2022, accepted 27.12.2022

Abstract. The main focus is on the global and regional approach to the study of the spatial distribution of the phytopigments dynamic characteristics in the ocean and land. The results of satellite studies are shown. Based on the dynamics of phytopigments in the ocean and land, quasi-stationary zones have been found. These zones reflect the dynamics of global biological, hydrological and climatic processes. The development of remote sensing methods using multilevel optical spectral monitoring systems is proposed.

Keywords: biosphere, dynamics, phytopigments, ocean, vegetation, land, agrocenoses.

Citation: Shevyrnogov, A.P., Vysotskaya, G.S., Pisman, T.I., Kononova, N.A., Botvich, I. Yu. Perspective for global and regional monitoring of phytopigment dynamics in the ocean and land by Earth remote sensing. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(1), 104–114. EDN: ZCJMUS



Перспективы глобального и регионального мониторинга динамики фитопигментов в океане и на суше на основе дистанционного зондирования Земли

**А. П. Шевырнов, Г. С. Высоцкая,
Т. И. Письман, Н. А. Кононова, И. Ю. Ботвич**
*Институт биофизики СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Основное внимание уделено глобальному и региональному подходу к изучению пространственного распределения динамических характеристик фитопигментов в океане и на суше. Показаны результаты спутниковых исследований. Найдены квазистационарные зоны по динамике фитопигментов в океане и на суше. Найденные зоны отражают динамику глобальных биологических, гидрологических и климатических процессов. Предлагается развитие методов дистанционного зондирования с применением многоуровневых систем оптического спектрального мониторинга.

Ключевые слова: биосфера, динамика, фитопигменты, океан, растительность, суша, агроценозы.

Цитирование: Шевырнов А. П. Перспективы глобального и регионального мониторинга динамики фитопигментов в океане и на суше на основе дистанционного зондирования Земли / А. П. Шевырнов, Г. С. Высоцкая, Т. И. Письман, Н. А. Кононова, И. Ю. Ботвич // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(1). С. 104–114. EDN: ZCJMUS

*Статья посвящена памяти академика РАН
Иосифа Исавича Гительсона, который внес
неоценимый вклад в развитие направления ис-
следований, представленных в данной работе.*

Актуальность изучения динамики биосферы возросла в связи с многочисленными проявлениями глобального воздействия человечества на окружающую среду. Воздействие промышленных выбросов, бесконтрольное или слабо контролируемое использование лесных и водных ресурсов стали все более заметными в глобальных и региональных масштабах.

В связи с этим возникла острая проблема экспрессного контроля состояния биосферы. Во второй половине XX века началось бурное освоение космоса и связанных с этим технологий. Изучение Земли из космоса стало одним из важнейших направлений науки. Развитие дистанционного зондирования из космоса привело к созданию многочисленных спутниковых методов с использованием электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах – ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и микроволновом. Основными преимуществами современных методов космического дистанционного зондирования являются повторяемость и удовлетворительное пространственное разрешение применяемой аппаратуры.

Одновременное развитие информационных технологий стало решающим для эффективного использования космической информации. Очевидно, что освоение ее, как качественно,

так и количественно, невозможно без современных геоинформационных методов и подходов. Стало возможным увидеть глобальные процессы, которые было бы невозможно быстро оценить традиционными методами контактных измерений.

Применение экспрессных методов изучения биосферы

Понимание необходимости соответствия применяемых методов масштабам объекта представлено в Институте биофизики СО РАН в разработке концепции – изучение биологических объектов физическими методами, применимыми как для океана, так и для суши.

В ИБФ СО РАН была создана серия полевых спектрорадиометров, работающих на различных оптических принципах. Для данной аппаратуры были созданы специализированные измерительно-вычислительные комплексы. В итоге была разработана аппаратура для использования на кораблях и самолетах. На основе этого были представлены научные программы изучения динамики растительности Земли – «Хлорофилл в биосфере» и «Зеленая волна».

Специально созданная группа исследователей, работавшая по названным программам, получила первые научные результаты в самых различных биогеографических условиях. Работы проводились по следующим направлениям:

- негативное влияние целлюлозно-бумажного комбината на оз. Байкал;
- динамика фитопланктона в районе работ рыбодобывающего флота на Дальнем Востоке около островов Кунашир и Хоккайдо;
- состояние озер полуострова Таймыр, Красноярского водохранилища и русла Енисея от Дивногорска до Диксона;
- нефтяные загрязнения в Черном море (в районе Новороссийска) и на Каспийском море (в районе Нефтяных камней) и др.

Квазистационарные зоны по динамике хлорофилла в Мировом океане

В настоящее время методы дистанционного зондирования в океане быстро развиваются и широко применяются для изучения пространственного распределения фитопигментов [1–3], изучения динамики океанских вод [4, 5] и др.

Наиболее значимыми стали результаты по выявлению квазистационарных зон динамики хлорофилла в Мировом океане в глобальном масштабе.

Квазистационарные зоны (КСЗ) – области со сходной сезонной динамикой концентрации хлорофилла. Для их выделения построены карты распределения дисперсии концентрации хлорофилла в скользящем режиме на основе их среднесезонных значений. Использовалась информация спутниковой аппаратуры CZCS (Coastal Zone Color Scanner) и SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) по измерениям поверхностных слоев океана.

Результаты обработки многолетних спутниковых данных CZCS показали наличие в Мировом океане зон с устойчивой пространственно-временной структурой сезонной динамики концентрации хлорофилла в поверхностном слое океана (КСЗ) [6,7].

Обнаружено, что расположение КСЗ привязано к крупно- и мелкомасштабной гидрологической структурам океанических вод, таким как океанические и прибрежные течения, апвеллинги и др. На пространственное распределение фитопланктона оказывают влияние не-

сколько факторов – концентрация биогенных элементов, световые условия, температура и др. Эти факторы зависят от характера динамики океанических вод и географических условий изучаемого района. Таким образом, пространственная неоднородность концентрации хлорофилла и, в частности, расположение и устойчивость КСЗ могут служить маркером многолетних и краткосрочных изменений гидрологической структуры океана. Это тесно связано с климатическими отклонениями, имеющими важные последствия (вплоть до катастрофических) для прилегающих районов суши.

При обработке данных, полученных с помощью SeaWiFS, удалось получить спутниковые изображения с более высоким качеством. Такие данные позволили выявить более тонкую структуру КСЗ по сравнению с данными, полученными на основе CZCS (рис. 1).

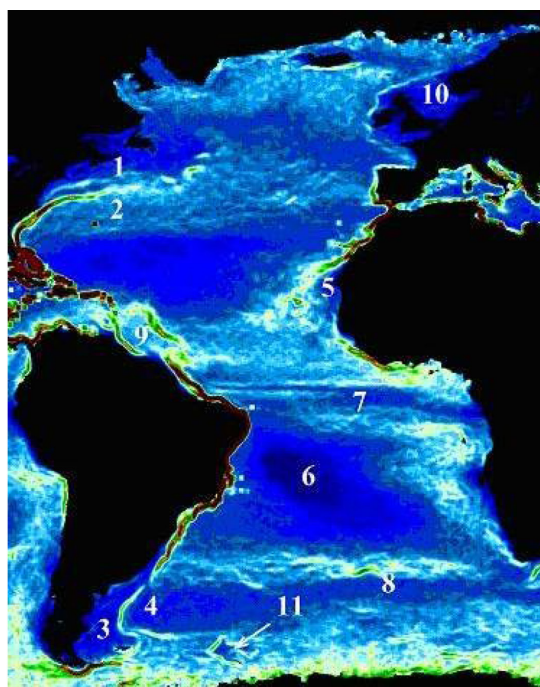


Рис. 1. Распределение зон, квазистационарных по динамике концентрации хлорофилла, на территории Атлантического океана (по данным SeaWiFS, 1997–2002 гг.). Цифрами от 1 до 11 выделены характерные квазистационарные зоны, связанные с различными гидрологическими и гидробиологическими особенностями Атлантического океана: 1. Лабрадорское течение, 2. Гольфстрим, 3. Фолклендское течение, 4. Бразильское течение, 5. Канарский апвеллинг, 6. Южно-Атлантический субтропический круговорот, образованный Южно-Атлантическим, Бразильским и Бенгельским течениями, 7. Зона, связанная с Южным пассатным течением, 8. Зона, связанная с Южно-Атлантическим течением, 9. Зона выноса вод реки Амазонки, 10. Зона шельфа вокруг Британских островов, 11. Район высокой биологической продуктивности вокруг острова Южная Георгия

Fig. 1. Distribution of zones that are quasi-stationary according to the dynamics of chlorophyll concentration, on the territory of the Atlantic Ocean (based on SeaWiFS data, 1997–2002). The numbers from 1 to 11 designate the characteristic quasi-stationary zones associated with various hydrological and hydrobiological features of the Atlantic Ocean: 1. The Labrador Current; 2. The Gulf Stream; 3. The Falkland Current; 4. The Brazil Current; 5. The Canary Current upwelling; 6. The South Atlantic subtropical cycle formed by the South Atlantic, Brazil and Benguela currents; 7. The zone associated with the South Equatorial Current; 8. The zone associated with the South Atlantic Current; 9. The drainage area of the Amazon River; 10. The shelf area around the British Isles; 11. The area of high biological productivity around the island of South Georgia

На рис. 1 приведена картосхема КСЗ в Атлантическом океане. Районы с подобной сезонной динамикой поверхностной концентрации хлорофилла и медленным изменением ее абсолютных величин, с малыми величинами дисперсии, выделены синими и темно-синими тонами. Противоположный эффект – высокие величины скользящей дисперсии, выделены светло-синими тонами. Они характерны для границ между КСЗ (например, фронтальных зон, фронтов) и для участков с сильно изменяющейся сезонной динамикой концентрации фитопигментов – зоны с неустойчивой гидрологической структурой.

Для тех областей, где концентрация хлорофилла меняется незначительно, значения скользящей дисперсии невелики, но они резко возрастают там, где измеряемая область переходит к другому типу сезонной динамики. В зависимости от размеров используемого скользящего окна выделяются зоны разных масштабов. Было установлено, что для океанов оптимальным является размер 11×11 пикселей, сторона квадрата 99 км. Для прибрежных и внутренних морей оптимальны квадраты размером 5×5 пикселей, сторона квадрата 45 км.

Результаты, полученные на основе анализа данных SeaWiFS, позволили более точно по сравнению с CZCS выявить квазистационарные зоны. Это оказалось возможным благодаря двум основным факторам – более совершенной аппаратуре и улучшенному биооптическому алгоритму интерпретации количества фитопигментов в поверхностном слое океана.

Проведенные расчеты показали, что основные квазистационарные зоны сохраняют свое расположение и форму как по данным SeaWiFS, так и данным CZCS. Это относится к зонам, зависящим от крупных океанских течений – например, в северной части Атлантики по обе стороны фронта между Гольфстримом (2) и Лабрадорским течением (1) (рис. 1). Отличия в сезонной динамике концентрации хлорофилла в них определяются различной природой вод и температурными условиями. В южной части Атлантики аналогичная картина – КСЗ наблюдаются по обе стороны фронта, разделяющего теплые воды Бразильского течения (4) с низкими значениями концентрации хлорофилла ($0.3\text{--}0.5 \text{ мг/м}^3$) и холодные антарктические воды Фолклендского течения (3), где концентрация хлорофилла обычно превышает 0.5 мг/м^3 . Данные SeaWiFS позволили также выделить особенности прибрежных районов на юго-западном побережье Южной Америки с Перуанским течением и течением мыса Горн.

По причине широкого охвата (фактически почти всей поверхности океана) не все проявления КСЗ удастся интерпретировать, особенно мелкомасштабные. Наблюдается ряд аномалий, изучение которых представляет интерес. Также представляют интерес локальные КСЗ в районах выноса крупных рек и крупных промышленных центров, которые могут явиться следствием антропогенного воздействия.

В целом можно сделать вывод, что спутниковая информация, выявляющая биологические процессы, их стабильность и неустойчивость, является мощным инструментом, позволяющим получать как фундаментальные знания об океаносфере, так и практические данные, которые могут быть использованы в рыболовстве, экологии, гидрометеослужбах.

Таким образом, применение современных спутниковых и информационных технологий дает уникальную возможность контроля динамики биоокеаносферы, которая, в свою очередь, может быть использована для контроля многолетних изменений, связи этих изменений с изменением климата и контроля газообмена в биосфере.

Квазистационарные зоны динамики трендов NDVI земной поверхности

Результаты выявления квазистационарных по сезонной динамике зон хлорофилла в океане показали, что динамика фитопигментов является хорошим индикатором различных геофизических процессов. Отсюда вытекает, что можно сделать попытку применения этого подхода к анализу спутниковой информации при изучении растительности суши.

Методы спутникового зондирования получили развитие для оценки состояния экосистем [8], динамики лесной растительности [9], динамики тундры [10] и др. Однако в значительной части эти методы применялись либо для изучения ограниченных территорий, либо имели ограниченные временные ряды для адекватного изучения многолетних трендов.

Нами, применительно к суше, разработан новый метод выявления пространственной неоднородности нелинейных трендов NDVI на основе использования космических данных. Тренды NDVI вычислялись по GMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) с 1982 по 2006 г. Были использованы полумесячные композитные изображения, разрешение 8-км (на линии экватора), масштаб глобальный, спутник NOAA сканер AVHRR.

Метод, который использовался для декомпозиции временных рядов, – STL (Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess) – процедура сезонно трендовой декомпозиции, основанная на методе сглаживания Loess [11, 12]. Затем для выявления пространственного распределения типов нелинейных трендов был использован метод скользящей дисперсии.

Названный подход позволил выявить квазистационарные зоны, отражающие распределение районов суши с подобными изменениями трендов NDVI растительности в глобальном масштабе. Выявлено соответствие пространственного распределения типов трендов с различными природными зонами (рис. 2 и 3). Границы между этими зонами показывают значительное увеличение дисперсии.

На рис. 2 отражено пространственное распределение квазистационарных зон дисперсии нелинейных трендов NDVI в глобальном масштабе.

На рис. 3 показано глобальное распределение растительности биомов на карте Мира. Выявлено совпадение квазистационарных зон низкой дисперсии нелинейных трендов NDVI (рис. 2) и биомов на карте Мира (рис. 3).

Метод скользящей дисперсии позволил выделить границы природных комплексов, так как для различных природных комплексов характерна различная динамика растительности. Применение такого метода дает возможность выделения зон с большими различиями «поведения» трендов.

Разработанный и апробированный метод выделения районов с подобным типом динамики биологических процессов открывает новые возможности для получения фундаментальных знаний: о функционировании биосферы, о последствиях глобального потепления, об изменении границ вечной мерзлоты, о глобальном газообмене и т.д.

В дальнейшем разработанная методика выявления динамических характеристик растительности суши спутниковыми методами позволит на меньших пространственных масштабах выходить на практическое применение в различных областях природопользования и народного хозяйства.

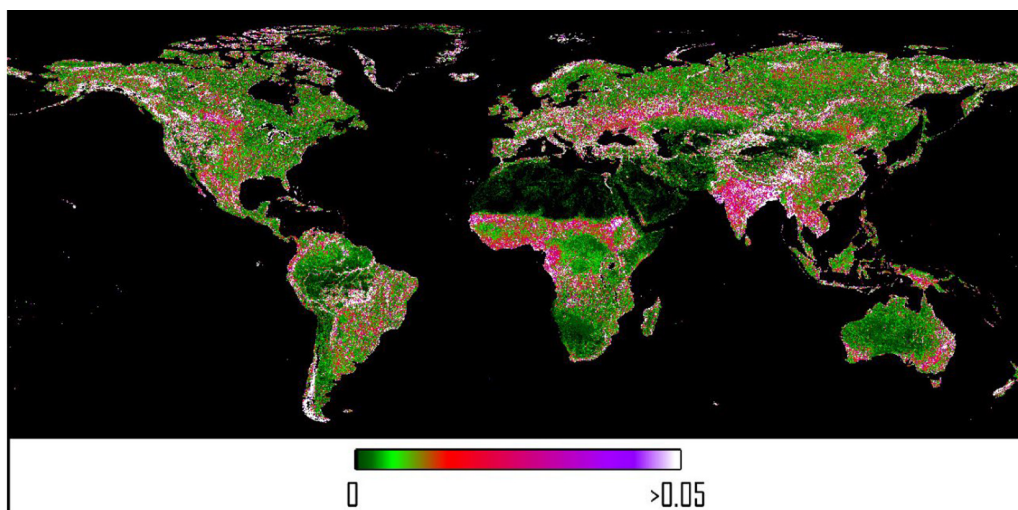


Рис. 2. Пространственное распределение дисперсий NDVI 2000–2017 гг. (окно 5x5). Август. Зеленым цветом выделен одинаковый тип растительности с низкой дисперсией NDVI, красным и белым – смешанный тип растительности с повышенной и высокой дисперсией NDVI – переходные зоны

Fig. 2. Spatial distribution of NDVI dispersions in 2000–2017 (5x5 window). August. Green color indicates the same type of vegetation with low NDVI dispersion, red and white – a mixed type of vegetation with elevated and high NDVI dispersion – transition zones

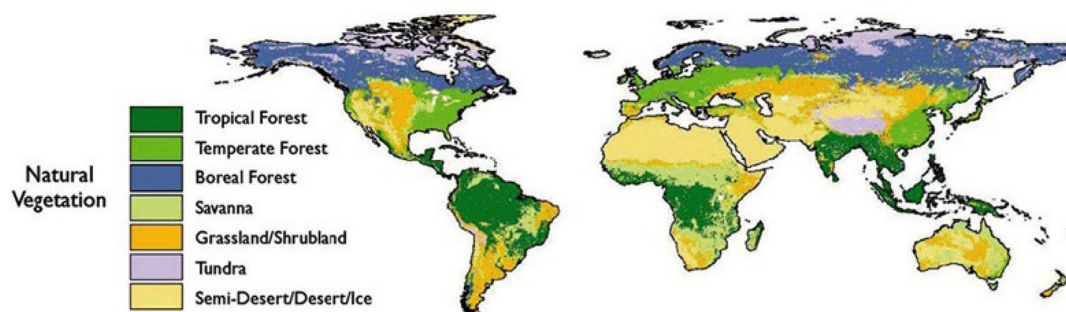


Рис. 3. Пространственное распределение растительности на карте Мира [13]

Fig. 3. Spatial distribution of vegetation on the World map [13]

Анализ динамики температур на севере Красноярского края

Лабораторией исследованы глобальные и региональные (Красноярский край) данные пространственного распределения и динамики радиационной температуры на поверхности Земли по спутниковым данным (сканер MODIS, спутник Terra, сканер AMRS-E, спутник Aqua) за 2000–2013 гг. (рис. 4). Данные представляют собой 8-дневные, среднемесячные и среднегодовые композиты.

Из анализа полученных данных о динамике радиационной температуры (рис. 4), видно, что на широтах 60° – 65° изменения за период 2000–2013 гг. имеют колебательный характер в пределах 5° . Однако при анализе данных на более высоких широтах (75° – 85°) видно, что наблюдалось значимое ($\approx 4^{\circ}$) падение средних температур с 2000 по 2003 гг., затем средние тем-

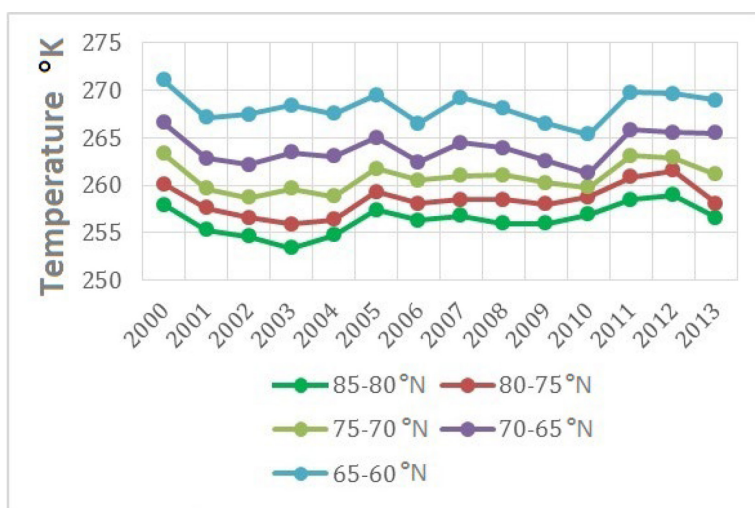


Рис. 4. Среднегодовая температура поверхности северных территорий Красноярского края (усредненная по широтным поясам)

Fig. 4. Average annual surface temperature of the northern territories of the Krasnoyarsk Territory (averaged over latitudinal zones)

пературы в 2013 г. вернулись к уровню 2000 г. Следует обратить внимание, что в 2012–2013 гг. началось существенное падение средних температур на широтах 70° – 85° . Скорость падения температур и большая территория, охваченная этим явлением, могут дать основу для предположения, что это может быть началом более глубокого снижения температур в глобальном масштабе.

Пространственно-распределенные данные динамики температур могут быть использованы для анализа потоков углерода в результате почвенного дыхания в выделенных регионах и биосфере в целом.

Заключение

Результаты исследований говорят об эффективности использования спутниковой информации для выявления динамических процессов в глобальном и региональном масштабах. Разработанные подходы могут использоваться как для получения фундаментальных знаний о динамике земной растительности, так и для различного типа прикладных задач.

В качестве примера развития современных спутниковых технологий можно рассмотреть территорию Красноярского края. Красноярский край характеризуется несколькими основными факторами: большой площадью, малой плотностью населения, значительными запасами природных ресурсов. Отсюда возникает сложность быстрого контроля динамики негативных природных и антропогенных факторов, так как редкая сеть станций наземных наблюдений за экологическим состоянием атмосферы, гидросферы и литосферы не обеспечивает поступления достаточной информации для обнаружения неблагоприятных и чрезвычайных экологических ситуаций, устранения их последствий и проведения профилактических мероприятий.

В этих условиях сложный комплекс задач, возникающий при мониторинге территории Красноярского края, может быть решен путем развития комплексной, многоцелевой научно-

технической программы «Енисейский меридиан из космоса». Для этого предложена Трехуровневая система мониторинга [14].

Особенностью предлагаемой системы космического мониторинга является возможность получения данных о состоянии земной поверхности одновременно на трех уровнях:

- первый – получение информации с космического аппарата дистанционного зондирования с расположением спутника на приполярной орбите;
- второй – проведение детальной съемки необходимых областей земной поверхности с использованием беспилотного летательного аппарата;
- третий – использование наземного комплекса сбора информации.

Работающая на различных уровнях аппаратура позволяет выполнять съёмку различных участков Земли на разных высотах, проводить калибровку, обрабатывать полученные данные. Такой подход обеспечивает большой охват территории с помощью спутников на верхнем уровне и возможность детального изучения выявленных отклонений и особо важных объектов с помощью приборов нижнего уровня. Также оборудование нижнего уровня позволит проводить подоблачные измерения спектральной отражательной способности объектов. Появляется возможность отслеживания предполагаемых изменений природной среды и тестирования результатов прогнозирования.

Перспективы применения трехуровневой системы мониторинга

На основе предлагаемой системы спутникового, беспилотного и наземного мониторинга возможно решать следующие задачи:

- контроль зоны вечной мерзлоты;
- мониторинг антропогенного влияния на окружающую среду;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций: предупреждение, контроль и оценка последствий наводнений, пожаров, организация информационного обеспечения в экстренных ситуациях.

Сельское хозяйство:

инвентаризация сельскохозяйственных угодий, идентификация различных типов культур, почвоведение, гидрология, метеорология, предотвращение сельскохозяйственных катастроф, прогнозирование урожаев и анализ сельскохозяйственного потенциала.

Землепользование:

- топографическое и тематическое картографирование, наблюдение за ростом городов, наблюдение за пастбищами, распределением и миграцией животных, составление земельных кадастров, составление кадастров природных ресурсов;

- мониторинг фактического использования земель района, включающий получение информации о состоянии территории, решение проблем упорядочивания существующей застройки, определение точных границ застроек;

- оценка состояния площадок для строительства и подъездных путей к ним, подбор земельных участков для размещения объектов нового строительства, создание и обновление цифровой картографической основы земельного кадастра;

- оценка состояния коммуникаций, включая картирование и уточнение схем расположения коммунально-энергетических сетей, мониторинг состояния тепловых сетей, трубопроводов;

– мониторинг состояния полигонов бытовых отходов, выявление несанкционированных свалочных мест в промышленных зонах и среди объектов природного комплекса, мониторинг объектов в пределах промзон.

Лесное хозяйство:

– контроль за сохранением лесов, определение типов лесонасаждений и доминирующих пород, картографирование лесов, количественная оценка биомассы, лесоводство, изучение водного режима лесных массивов;

– инвентаризация зеленых насаждений, оценка их общей площади, выявление очагов заболеваний, распределение зеленых насаждений по категориям состояния, контроль приживаемости молодых посадок;

– контроль водных ресурсов: определение водного эквивалента снега, косвенное обнаружение грунтовых вод, очерчивание водных слоёв, мониторинг наводнений, контроль качества воды;

– снегозапасы и ледовая обстановка: анализ взаимодействия льда и атмосферы, измерение температуры и толщины льда, выявление и классификация областей снежного покрова, определение характеристик снежного покрова.

Предлагаемый подход может стать основой для создания системы дистанционного зондирования Земли на всей территории России.

Список литературы / References

[1] Blondeau-Patissier D., Gower J., Dekker A. G., Prinn S. R., Brando V. E. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans, *Progress in Oceanography*, 2014, 123, 123–144.

[2] Pottier C., Garcon V., Lamicol G., Sudre J., Schaeffer P., Le Traon P.-Y. Merging SeaWiFS and MODIS/Aqua ocean color data in North and equatorial Atlantic using weighted averaging and objective analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44, 3436–3450.

[3] Кивва К. К., Кубряков А. А. Сезонная и межгодовая изменчивость поля концентрации хлорофилла-а в Беринговом море по спутниковым данным, *Исследование Земли из космоса*, 2021, 4, 28–45. DOI: 10.31857/S 0205961421040047 [Kivva K. K., Kubryakov A. A. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' polya koncentracii hlorofilla-a v Beringovom more po sputnikovym dannym, *Issledovanie zemli iz kosmosa*, 2021, 4, 28–45 (in Rus.)].

[4] Barnes B. B., Hu C., Schaeffer B. A., Lee Z., Palandro D. A., Lehrter J. C. MODIS-derived spatio – temporal water clarity patterns in optically shallow Florida keys waters: a new approach to remove bottom contamination, *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134, 377–391.

[5] Le C., Hu C., English D., Cannizzaro J., Chen Z., Feng L., Boler R., Covach C. Towards a long-term chlorophyll-a data record in a turbid estuary using MODIS observations, *Progress in Oceanography*, 2013, 109, 90–103.

[6] Shevyrnogov A. P., Vysotskaya G. S., Gitelzon J. I. Quasistationary areas of chlorophyll concentration in the World Ocean as observed satellite data, *Adv. Space Res.*, 1996, 18(7), 129–132.

[7] Shevyrnogov A. P., Vysotskaya G. S., Shevyrnogov E. A. A study of the stationary and the anomalous in the ocean surface chlorophyll distribution by satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(7–8), 1383–1387.

[8] Li Z., Xu D., Guo X. Remote sensing of ecosystem health: opportunities, challenges, and future perspectives, *Sensors*, 2014, 14, 21117–21139.

[9] Chernetskiy M., Pasko I., Shevyrnogov A., Slyusar N., Khodyayev A. A study of forest vegetation dynamics in the south of the Krasnoyarskii Krai in spring, *Adv. Space Res.*, 2011, 48(5), 819–825.

[10] Davidson S.J., Maria J., Santos M.J., Sloan V.L., Watts J.D., Phoenix G.K., Oechel W.C., Zona D. Mapping Arctic tundra vegetation communities using field spectroscopy and multispectral satellite data in North Alaska, USA, *Remote Sens.*, 2016, 8, 978.

[11] Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess, *Journal of Official Statistics*, 1990, 6, 3–73.

[12] Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Шевырнов А.П. Нелинейные тренды чистой первичной продукции растительности юга Красноярского края по спутниковым данным: методы и подходы, *Фундаментальные исследования*, 2015, 3, 106–110. [Lar'ko A.A., Ivanova Yu.D., Shevyrnogov A.P. Nelinejnye trendy chistoj pervichnoj produkcii rastitel'nosti yuga Krasnoyarskogo kraja po sputnikovym dannym: metody i podhody, *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, 3, 106–110].

[13] (<https://seos-project.eu/landuse/landuse-c01-ws01-s.html>)

[14] Shevyrnogov A. P., Yakovlev A. V., Popov V. V., Larko A. A., Valov M. V. Satellite monitoring system for the Krasnoyarsk territory area based on small satellites use, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, 3(8), 331–345.