

УДК 004.042

Н. Н. Попов, В. М. Абрамов, Л. В. Александрова, В. Г. Бурлов
Российский государственный гидрометеорологический университет

Г. В. Разумовский
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Г. Н. Ткаченко, А. Н. Попова
АО «НИЦ СПб ЭТУ»

Модель геоинформационного обеспечения наблюдения за состоянием почвы и растительного покрова в Арктике по данным дистанционного зондирования Земли и подспутниковых распределенных наблюдений

Приводится обзор методов автоматизированной оценки биофизического воздействия, основанных на данных дистанционного зондирования, а в качестве количественного показателя растительного покрова применяется нормализованный относительный индекс растительности (NDVI). Рассмотрена модель геоинформационного обеспечения наблюдения за состоянием почвы и растительного покрова труднодоступных районов Арктики по данным, получаемым с помощью современных спутниковых систем Sentinel-1, Landsat7, Landsat8 и MODIS. Приводятся соотношения каналов и полос частот данных систем, а также их комбинации для проведения требуемых наблюдений. Обсуждается возможность использования количественного показателя изменения биосферы (BACI) на основе комбинации архивных и измеряемых в реальном времени данных. В качестве портативных измерителей авторы рассматривают применение системы на основе платы Arduino или одноплатного компьютера Raspberry Pi и набора датчиков. Описанные методы могут использоваться для первичного обследования обширных территорий и планирования управленческих решений при проведении лесохозяйственных, природоохранных и спасательных работ.

Геоинформационное обеспечение, дистанционное зондирование Земли, Landsat, Sentinel

Наблюдение за состоянием почвы и растительного покрова является важной частью функционала геоинформационного менеджмента сложных, пространственно-распределенных территориальных систем [1] в труднодоступных районах Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Отдельной проблемой является наличие архива долгосрочных наблюдений, позволяющих оценивать развитие процесса в динамике на протяжении нескольких десятилетий. Отметим, что аналогичная ситуация существует в рамках интегрального управления водными ресурсами (ИУВР) в Арктике [2], [3] и управления качеством воздуха в Арктике [2], [4], [5].

Наблюдение за состоянием растительного покрова в труднодоступных районах арктической зоны является актуальной задачей при рациональном природопользовании в условиях изменения климата. Исследовательские и управленче-

ские задачи направлены на предупреждение экологических катастроф и управление энвиронментальными рисками. Помимо физического воздействия на экосистемы негативные изменения растительного покрова вызывают различные социально-экономические проблемы, связанные с реализацией традиционных видов промыслов, характерных для арктических регионов. Мониторинг и формирование на его основе управленческих решений относится к числу стратегий, которые могут быть применены для борьбы с уменьшением растительного покрова территорий. Выбор источников данных дистанционного зондирования (ДДЗ) был обусловлен сложностью доступа к исследуемому району, а также отсутствием необходимой инфраструктуры для проведения масштабных полевых исследований. Дополнительные проблемы связаны с необходимостью серьез-

ного финансового обеспечения натуральных исследований и сложностью получения долгосрочных наблюдений.

Вегетационные индексы (например, NDVI) могут использоваться в качестве показателя доли растительного покрова. Замечено, что отражательная способность растительного покрова зависит от его структурных особенностей (форма листа, хвойная или лиственная порода) и состояния (увлажненность, возраст, здоровье). Данная связь позволяет использовать информацию отдельных каналов систем ДДЗ для оценки состояния растительности и ее типа.

VARI (индекс устойчивости к видимой атмосфере) был разработан и протестирован для работы с данными RGB, а не с околоинфракрасным диапазоном. Это показатель «зеленого» изображения. VARI разработан для выделения растительности в видимой части спектра при ослаблении влияния разницы освещения и атмосферных явлений. Он идеально подходит для RGB или цветных изображений; использует все 3 цветовых канала; измеряет коэффициент отражения растительности и почвы.

ENDVI (усовершенствованный нормализованный индекс растительности) включает сравнение зеленого и синего света в дополнение к околоинфракрасному и инфракрасному, чтобы дать более чувствительный результат. Это изолирует показатели здоровья растений и может использоваться для оценки наличия и здоровья урожая.

GNDVI – это модифицированная версия алгоритма NDVI, сочетающая зеленый и околоинфракрасный свет, чтобы лучше указывать на изменение содержания хлорофилла в растительности. Также помогает проанализировать дефицит/избыток воды и азота в урожае.

SAVI использует коэффициент коррекции яркости почвы для анализа участков, не покрытых растительностью.

RDVI похож на SAVI, поскольку он подавляет воздействие почвы и солнца. Однако, в отличие от SAVI, это не работает также в малозаселенных или сухих районах.

Из-за простоты использования и взаимосвязи со многими параметрами экосистемы NDVI широко распространено в экосистемах пастбищных угодий. Использование включает в себя оценку или мониторинг: динамики растительности или фенологических изменений растений со временем; производства биомассы; пастбищных воз-

действий или атрибутов, связанных с управлением выпасом; изменения условий пастбищного угодья; классификации растительности или растительного покрова; влажности почвы; поглощения углерода или потока CO₂.

Растительность кажется очень различной на видимой и околоинфракрасной длинах волн. В видимом свете (вверху) растительные районы очень темные, почти черные, в то время как пустынные районы (например, Сахары) являются легкими. На околоинфракрасных длинах волн растительность ярче, а пустыни примерно одинаковы. Сравнивая видимый и инфракрасный свет, ученые измеряют относительное количество растительности.

Инструмент NOAA AVHRR, например, имеет 5 детекторов, 2 из которых чувствительны к длинам волн света от 0.55 до 0.70 и 0.73...1.0 мкм. С помощью детекторов AVHRR исследователи могут измерять интенсивность света, исходящего от Земли, на видимой и околоинфракрасной длинах волн и количественно определять фотосинтетические способности растительности в заданном пикселе (пиксель AVHRR составляет 1 кв. км) поверхности суши. В общем случае, если на околоинфракрасных длинах волн гораздо больше отраженного излучения, чем на видимых длинах волн, то растительность в этом пикселе, вероятно, будет плотной и может содержать некоторый тип леса. Если в интенсивности отражения видимых и ближних инфракрасных волн очень мало различий, то растительность, вероятно, редкая и может состоять из пастбищ, тундры или пустыни.

Однако для учета двух основных источников влияния на временную изменчивость состояния растительности – годового сезонного цикла и межгодовой климатической изменчивости, которые препятствуют возможности прямого сравнения, – необходимо анализировать обширную базу спутниковых наблюдений, поделенную на соответствующие сезоны. VASCI успешно применяется для статистической оценки потенциальных экологических состояний среды (Smith, 2002).

Предлагается использовать индекс VASCI для оценки межгодового состояния растительного покрова на основе вегетационного индекса NDVI, рассчитанного на основе ДДЗ. Данную оценку можно использовать в качестве подготовительного этапа при планировании полевых наблюдений.

Дистанционное зондирование. В качестве района исследования был выбран западный берег озера Таймыр (рис. 1), где располагается основная территория Таймырского государственного природного заповедника, получившая в 1995 г. решением ЮНЕСКО статус биосферного. Применение данных дистанционного зондирования для геоинформационного обеспечения управления данной территорией позволит уменьшить время принятия решений.



Рис. 1

вы и здоровье растительного покрова. При анализе территории были использованы комбинации каналов, представленные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Полоса частот	Номер канала			
	Landsat-7	Landsat-8	Sentinel-2	MODIS
Синий	1	2	2	3
Зеленый	2	3	3	4
Красный	3	4	4	1
Ближний инфракрасный	4	5	8, 8A	2
Средний инфракрасный 1	5	6	11	6
Средний инфракрасный 2	7	7	12	7

Таблица 2

Название комбинации	Комбинация каналов			
	Sentinel-2	Landsat-7	Landsat-8	MODIS
Искусственные цвета	8, 4, 3	4, 3, 2	5, 4, 3	2, 1, 4
Здоровая растительность	8A, 11, 2	4, 5, 1	5, 6, 2	2, 6, 3
Инфракрасный	12, 8A, 4	7, 4, 3	7, 5, 4	7, 2, 1
NDVI	3, 8	4, 3	5, 4	1, 2

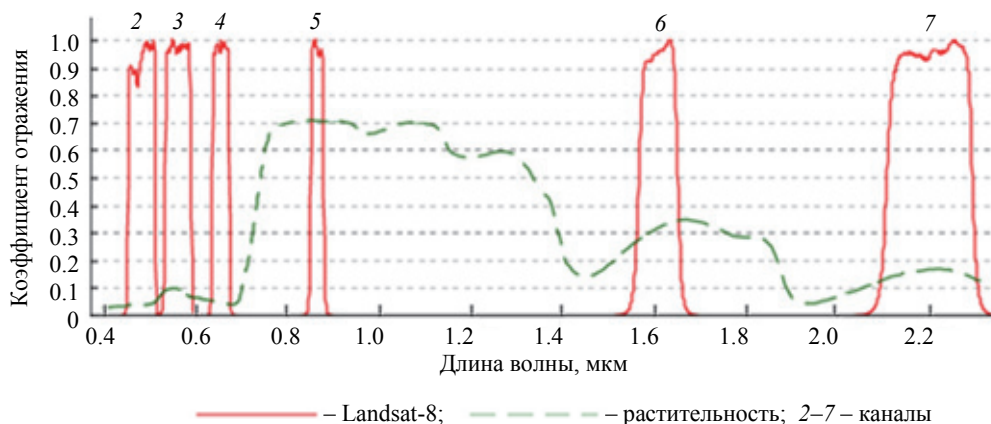


Рис. 2

Для анализа состояния биомассы использовались находящиеся в свободном доступе снимки систем Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2 и MODIS в различном пространственном разрешении: от 10 до 500 м на пиксель.

Как следует из рис. 2, максимальный коэффициент отражения солнечной радиации от растительности фиксируется в ближнем инфракрасном диапазоне (5-й канал), а минимальный – в синем, зеленом и красном видимом спектрах (каналы 2, 3 и 4). Данная особенность была использована при формировании комбинаций каналов, ассоциированных со схемой RGB и позволяющих выявлять структурные, качественные и количественные характеристики растительного покрова, а добавление коротковолновых инфракрасных каналов (6 и 7) позволяет оценивать влажность поч-

Искусственные цвета. Данная комбинация состоит из красного, зеленого и ближнего инфракрасного каналов и позволяет отобразить растительность в оттенках красного. При этом хвойные деревья будут выглядеть темнее лиственных пород. Комбинация позволяет оценивать вегетацию растительного покрова. Лед, снег и облака – белые или светло-голубые (рис. 3, а).

Здоровая растительность. Комбинация состоит из синего, ближнего и дальнего ИК-каналов, последний из которых отвечает за повышение чувствительности к возрасту растительного покрова. Как следует из названия, она предназначена для выделения участков здоровой растительности, которая отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и желтого цветов. Вырубленные территории отображаются голубым цветом.

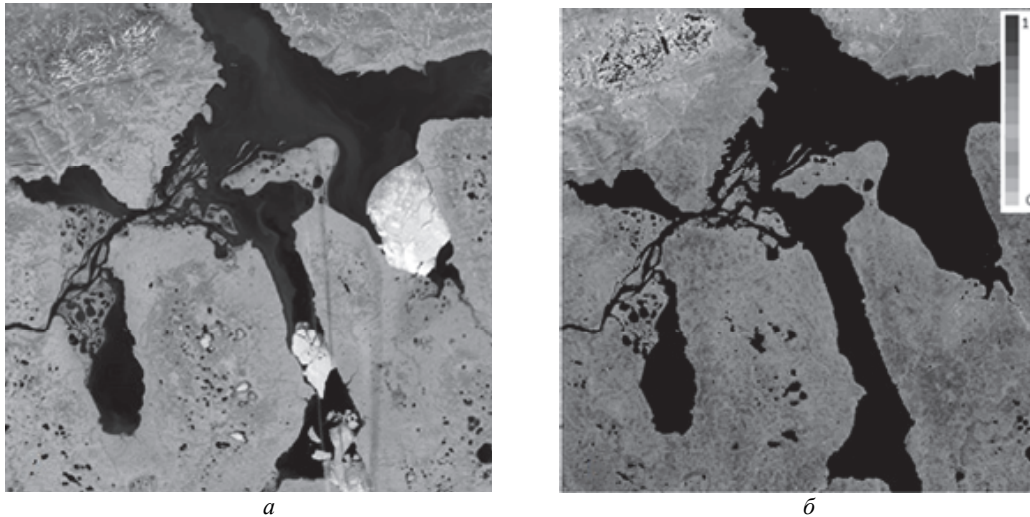


Рис. 3

Инфракрасный. Комбинация второго канала среднего ИК-диапазона в сочетании с ближним ИК и красным спектром видимого диапазона способствует определению количества накопленной влаги в листьях и в почве. Здоровая и увлажненная растительность отображается ярко-зеленым цветом, а сухая – бледно-зеленым. Также комбинация позволяет определять хвойные и лиственные леса – первый будет представлен темно-зеленым, а второй – светло-зеленым цветом на снимке.

Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI). Используется для определения засушливых районов и наблюдения за продуктивностью растительного покрова, биоразнообразия и общего состояния. Косвенно данный индекс позволяет определять районы с пожароопасной обстановкой. Для расчета данного вегетативного индекса используются 2 канала – красный, где поглощение солнечного излучения максимально, и ближний ИК, где оно минимально:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}},$$

где ρ_{NIR} и ρ_{RED} – отражение в ближнем ИК и красном диапазоне соответственно.

Данный индекс применим для определения состояния растительности, ее продуктивности и биоразнообразия (рис. 3, б).

Данные дистанционного зондирования перечисленных систем доступны с 2000 г., что позволяет оценивать происходящие процессы в динамике.

В качестве количественного показателя изменения биосферы был выбран ВАСИ, который позволяет оценить состояние объекта на основе измеряемых в реальном времени и архивных дан-

ных. Данный индекс позволяет интегрировать космические и наземные наблюдения для получения новых потоков данных, которые непосредственно не наблюдаются в глобальных масштабах, для выявления изменений в функционировании экосистем и формирования новых информационных продуктов, используемых в дальнейшем в управленческой деятельности. ВАСИ фокусирует внимание на получении данных, необходимых для мониторинга фундаментальных взаимодействий и обратных связей между биосферой и атмосферой. Главная исследовательская задача проекта ВАСИ посвящена разработке общего индекса изменений. Получаемый индекс должен быть способен обнаруживать множество различных типов аномалий. Однако проект ВАСИ указывает на совмещение ДДЗ с данными *in situ* для более точного формирования представлений о состоянии среды и формирования управляющего воздействия.

Одним из возможных источников натуральных данных является сеть метеорологических башен проекта FluxNet, измеряющих количество обмена углекислого газа, водяного пара и энергии между биосферой и атмосферой. На территории Российской Федерации работает 8 башен проекта (5 в Якутии, 1 в Тверской области, 1 в Хакасии и 1 в Республике Коми).

Однако оперативное получение измеренных данных вызывает сложности, связанные с медленным обновлением открытой базы данных системы, что приводит к решению о разворачивании мобильных измерительных станций, способных оперативно собирать и передавать информацию. В качестве базовой была выбрана технология интернета вещей, а основным критерием для подбора измерительной платформы были:

Компактность и надежность. Оборудование должно быть легко переносимо к месту эксплуатации, иметь достаточный уровень прочности и функционировать в сложных климатических условиях.

Низкая стоимость сборки и обслуживания. Расчетная стоимость оборудования и его обслуживания должна быть доступной для бюджета небольшой исследовательской организации.

Масштабируемость. При необходимости оборудование должно позволять дооснащение датчиками.

Простота использования. Оборудование должно потреблять не более 220 В и, по возможности, не требовать дополнительной настройки в месте эксплуатации.

В ходе исследования были рассмотрены образцы измерительной техники компаний MicroStep-mis и Campbell Scientific, отвечающие всем критериям, названным выше. Данные системы состоят из блока управления и набора подключаемых датчиков, информация с которых принимается, обрабатывается и отправляется посредством Интернета в базу данных. При высоком качестве исполнения прибора и датчиков данные инструменты отличаются сравнительно высокой стоимостью, а их модернизация и ремонт связаны с обращением к представителям компаний.

В качестве альтернативы были рассмотрены платы Arduino и одноплатные компьютеры Raspberry Pi в качестве контроллера, отвечающего за сбор, обработку и выгрузку в облако данных, и комплект датчиков, фиксирующих наблюдаемые параметры среды. Определив цели и задачи проектируемой системы, были выбраны следующие датчики, способные обеспечить фиксацию необходимых параметров среды:

DHT22 – датчик температуры и влажности воздуха. Имеет достаточно широкий диапазон применения от -40 до 125 °C ($\pm 0,5$ °C) и от 0 до 100 % ($\pm 2-5$ %) влажности воздуха.

BMP180 – датчик давления, работающий в диапазоне от 300 до 1100 ГПа.

FC-28-D – датчик влажности почвы.

MQ-2 – датчик дыма, способный также фиксировать некоторые газы, например метан.

Shinyei PPD42NS – датчик, позволяющий фиксировать наличие ультрадисперсных частиц в воздухе, на основе чего можно косвенно оценить наличие черного углерода. Принцип работы датчика основан на измерении количества частиц в объеме воздуха, проходящего через измерительный контейнер за единицу времени.

После подключения датчиков к плате Arduino или одноплатному компьютеру Raspberry Pi следует

определить принцип работы устройства. В случае с Arduino использовался язык программирования C++, в то время как для разработки программного обеспечения для Raspberry Pi более подходит среда Matlab, в составе которой имеются наборы блоков, упрощающих процесс создания проекта. В качестве хранилища измеренных параметров использовался портал ThingSpeak, который представляет собой облачное хранилище, доступное любому устройству, использующему протокол HTTP. В составе модуля Simulink support package for Raspberry Pi Hardware, входящего в Matlab, реализован блок автоматической отправки полученных данных на канал ThingSpeak, откуда они становятся доступны для анализа без необходимости подключения непосредственно к измерительному устройству.

После создания управляющей программы и ее развертывания на конечном устройстве система может работать полностью автономно без необходимости дополнительной настройки в месте эксплуатации. Единственным требованием является наличие электропитания и доступа к Интернету для отправки собранной информации. Пример измерения ультрадисперсных частиц приведен на рис. 4.

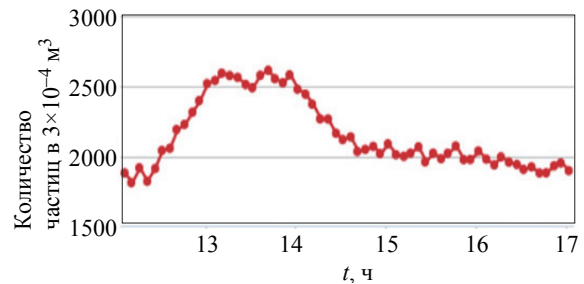


Рис. 4

При адекватной стоимости и простоте использования становится возможным создание сети описанных измерителей для покрытия обширных территорий как в труднодоступных районах, так и в среде мегаполиса.

Для сбора, обработки, объединения и хранения ДДЗ и данных, измеренных датчиками *in situ*, использовалась технология Big Data. Для целей данной работы использовался сервис Google cloud platform, предоставляющий в аренду вычислительные мощности. Его основным преимуществом является простота создания виртуальных машин под управлением Linux и Windows, а также масштабируемость, что немаловажно при развитии проекта. На базе созданных виртуальных машин реализовывались сценарии поиска и агрегации информации, относящейся к области интересов проекта и обработки с помощью различных ГИС.

Изложенные в статье результаты исследований обладают существенной научной новизной.

Они вносят существенный вклад в развитие морского потенциала АЗРФ [6], [7] и могут быть использованы при составлении магистерских про-

грамм в области наук о Земле с учетом положений Болонского процесса [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Methods for external factors assessing within geoinformation management of territories / E. P. Istomin, A. G. Sokolov, V. M. Abramov, G. G. Gogoberidze, A. A. Fokicheva // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th, Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 2015. P. 729–736.

2. Variability of particulate matter in Saint-petersburg megacity air within climatic time scale / V. M. Abramov, L. N. Karlin, J. A. Lednova, J. A. Malakhova, G. G. Gogoberidze, S. V. Berboushi // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14th, Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2014. Vol. 2, № 4. P. 599–606.

3. Geoinformation management as a modern approach to the management of spatially-distributed systems and territories Management as a modern approach to the management of spatially-distributed systems and territories / V. M. Abramov, E. P. Istomin, A. G. Sokolov, G. G. Gogoberidze, N. N. Popov // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th, Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2015. P. 607–614.

4. Concept of environmental monitoring in the Russian Arctic coastal regions / V. M. Abramov, G. G. Gogoberidze, L. N. Karlin, J. A. Lednova, S. V. Berboushi // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14th, Al-

Albena, Bulgaria; STEF92 Technology Ltd., 2014. Vol. 2, № 4. P. 321–330.

5. On route to Integrated Water Resources Management for Russian arctic and subarctic rivers / V. M. Abramov, L. N. Karlin, G. G. Gogoberidze, V. A. Golosovskaya, N. N. Popov // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14th, Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2014. Vol. 2, № 4. P. 495–501.

6. Анализ социально-экономической ситуации в арктических приморских субъектах Российской Федерации на основе индикаторной оценки морского потенциала / Л. Н. Карлин, В. М. Абрамов, Г. Г. Гогоберидзе, Ю. А. Леднова // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 30. С. 181–188.

7. Marine economic potential assessment for environmental management in the Russian Arctic and subarctic coastal regions / G. G. Gogoberidze, V. M. Abramov, L. N. Karlin, J. A. Lednova, J. A. Malakhova // Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14th, Albena, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2014. Vol. 2, № 4. P. 756–765.

8. Абрамов В. М., Карлин Л. Н., Скобликова А. Л. Гармонизация российских и европейских магистерских программ в области экологического туризма в рамках Болонского процесса // Ученые записки РГГМУ. 2006. № 3. С. 172–183.

N. N. Popov, V. M. Abramov, L. B. Alexandrova, V. G. Burlov

Russian State Hydrometeorological University

G. V. Razumovsky

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

G. N. Tkachenko, A. N. Popova

REC ETU SEC JSC

MODEL OF GEOINFORMATION SUPPORT FOR MONITORING OF A STATE OF SOIL AND VEGETATION COVER IN THE ARCTIC, BASED ON REMOTE SENSING DATA AND SUB-SATELLITE DISTRIBUTED OBSERVATIONS

Provide an overview of methods for automated assessment of biophysical effects based on remote sensing data. The normalized relative vegetation index (NDVI) is used as a quantitative indicator of vegetation cover. A model of geoinformation support for monitoring the state of soil and vegetation cover in hard-to-reach areas of the Arctic is considered based on data obtained with modern satellite systems Sentinel-1, Landsat7, Landsat8 and MODIS. The ratio of the channels and frequency bands of these systems, as well as their combinations for carrying out the required observations, are given. The possibility of using a quantitative measure of the biosphere change (BAC) based on a combination of archival and real-time data is discussed. As portable meters, the authors consider the application of the system based on the Arduino board or the Raspberry Pi single-board computer and a set of sensors. The described methods can be used for initial survey of large areas and planning of management decisions in forestry, nature protection and rescue operations.

Geoinformation support, remote sensing of the Earth, Landsat, Sentinel
