

Е.Ф. Чичкова, С.А. Кондратьев, Д.М. Рыжиков, А.С. Тимофеев, М.В. Шмакова

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ LANDSAT
С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ФИНСКИЙ ЗАЛИВ**

E.F. Chichkova, S.A. Kondratyev, D.M. Ryzhikov, A.S. Timofeev, M.V. Shmakova

**IDENTIFICATION OF THE LAND SURFACE TYPES
ON LANDSAT SATELLITE DATA TO ASSESS THE NUTRIENT LOAD
ON THE GULF OF FINLAND**

Разработан метод идентификации различных типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки. Результаты идентификации ориентированы на последующее использование для оценки биогенной нагрузки на водных объектов со стороны водосборных территорий. С использованием спутниковой информации проведены расчеты биогенной нагрузки на Финский залив, сформированной на водосборе реки Луги.

Ключевые слова: идентификация, спутниковый снимок, подстилающая поверхность, водосбор, модель.

A method for identification of different types of land surface using the satellite imagery was developed. The results of the identification focused on the subsequent use to evaluate the nutrient load on water bodies from the catchment areas. Using satellite data the nutrient load on the Gulf of Finland formed in the Luga River catchment area was calculated.

Key words: identification, satellite image, land surface, catchment, model.

Использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для проведения экологического контроля отдельных объектов и территорий оказывается весьма эффективным средством при решении прикладных задач [6, с. 253, 264]. В настоящее время ощущается острый дефицит исходных данных, необходимых для выполнения работ по моделированию природных систем, так как существующая система государственного мониторинга водных объектов характеризуется постоянным сокращением числа пунктов наземных наблюдений, сложностями с получением результатов натурных измерений и невысоким качеством получаемой информации. Космическая информация компенсирует указанный пробел в информационном обеспечении моделей. Безусловным достоинством методов идентификации типов подстилающей поверхности при помощи ДЗЗ являются оперативность получения информации и возможность описания пространственной неоднородности характеристик крупных территорий.

Целью настоящего исследования является:

- разработка метода идентификации типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки с ориентацией на последующее использование для оценки биогенной нагрузки на водные объекты со стороны водосборных территорий;

- реализация разработанного метода при моделировании формирования биогенной нагрузки на Финский залив (на примере водосбора р. Луги).

Типы подстилающей поверхности для выбранного экспериментального объекта (водосбора Луги) распознавались по пяти заданным категориям подстилающей поверхности: леса, поля, луга, болота и урбанизированные зоны, свалки и неиспользуемые земли. На рис. 1 представлена схема идентификации подстилающей поверхности по заданным категориям.

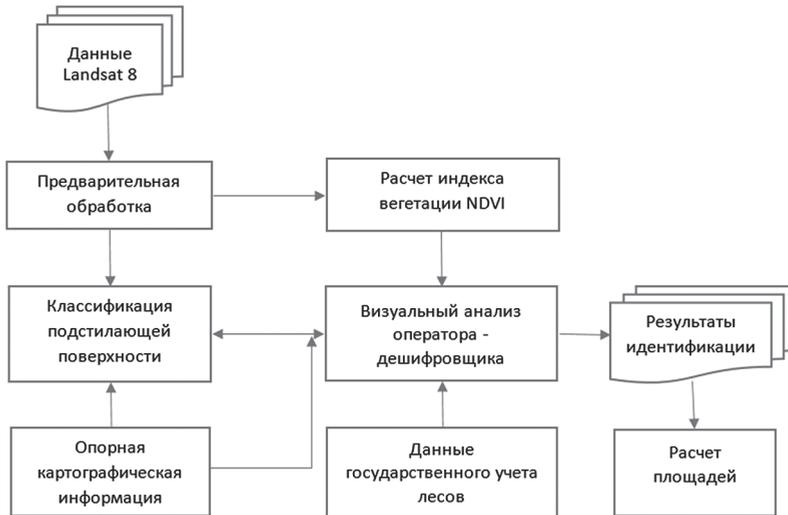


Рис. 1. Схема идентификации типов подстилающей поверхности на основе спутниковой информации Landsat-8

В качестве исходной информации использовались многоспектральные данные американского космического аппарата (КА) Landsat-8 среднего пространственного разрешения съемки (30 м) в семи каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов от 0,433 до 2,300 мкм и в канале качества QualityAssessment (QA). Данные были получены с сервиса Геологической службы США USGS (http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php) за две даты: 11.07.2014 и 17.08.2015.

Метод идентификации типов подстилающей поверхности, основанный на процедурах обработки спутниковой информации, был разработан для территории Северо-Западного района (Ленинградская, Псковская, Новгородская области и Республика Карелия). В основу распознавания заданных типов были положены специально разработанные объектно-ориентированные наборы спектральных образов этих типов в зависимости от условий съемки КА Landsat-8, от времени проведения съемки и от фенологической фазы растительности. Специально для заданной территории была разработана шкала для учета более подробных значений индекса вегетации. Для классификации типов использовались модули программного комплекса ERDAS Imagine Professional (<http://leica-geosystems.com>).

Обработка спутниковой информации включала два основных этапа: предварительную обработку и тематическую. Предварительная обработка состояла из первичной обработки данных (геометрической коррекции, калибровки) и из процедуры создания облачной маски. Облачная маска снимков космического аппарата Landsat-8 формировалась путем работы с каналом качества QA. Пиксели, соответствующие облачности по определенным цифровым значениям в QA, исключались из процесса классификации и автоматически добавлялись к классу «Облачность». В процессе обработки выявлена следующая особенность: по данным канала QA оптически не плотные облака и тени от облаков не идентифицируются. Поэтому проводилась дополнительная обработка данных при наличии облачности на снимках.

Тематическая обработка сводилась к поиску на водосборе участков изображений по заданным категориям типов подстилающей поверхности с применением следующих методов обработки спутниковых снимков [2, с. 136]:

- 1) классификация типов подстилающей поверхности (в автоматическом и в интерактивном режимах);
- 2) спектральные преобразования и отношения (расчет индексов вегетации);
- 3) визуальное дешифрирование (поиск объектов интереса на снимках без применения программных алгоритмов).

Классификация проводилась стандартными методами попиксельного анализа: методом расстояния Махаланобиса и методом максимального правдоподобия [1, с. 72] в автоматическом режиме. Пиксели на снимке относились к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти объекты. Тип поверхности «Урбанизированные зоны, свалки и неиспользуемые земли» достаточно четко идентифицировался методами попиксельной автоматической классификации.

В сложных для распознавания методами автоматической классификации ситуациях (например, смешивания типов подстилающих поверхностей, в основном, растительных) использовался также объектно-ориентированный подход, заключающийся в разбиении исходного спутникового снимка на сегменты по спектральной близости пикселей, где каждый сегмент классифицировался в отдельности. Данный подход помимо яркостных характеристик также позволял оценить геометрию объектов, что важно для классификации типа «Поля». В основу этого метода были положены спектральные характеристики анализируемых типов подстилающих поверхностей, специально полученные для Северо-Западного района по архивной спутниковой информации. Представленные в открытых источниках спектральные данные об объектах не могли напрямую применяться для дешифрирования изображений из-за отсутствия верифицированных правил пересчета относительных единиц коэффициентов спектральных яркостей к значениям яркости пикселей изображения.

Объектно-ориентированный подход классификации состоял из трех этапов.

На начальном этапе по снимкам Landsat-8 за период июль–август 2013–2014 гг. были построены спектральные образы для заданных типов подстилающей поверхности Северо-Западного района во всех семи каналах радиометра. Для минимизации искажающего влияния атмосферы, а также учета параметров освещенности земной поверхности солнцем использовался модуль атмосферной коррекции ATCOR с применением модели Modtran Midlat_summer_rural усредненных параметров атмосферы для средних широт в

летний период [6, с. 293]. Были рассчитаны осредненные характеристики спектральных яркостей для каждого заданного типа подстилающей поверхности, полученные по шести спутниковым снимкам 2013–2014 гг. На рис. 2 приведены примеры осредненных спектральных яркостей для типов подстилающей поверхности «Лес», «Поля/луга» и «Болота», в четырех наиболее информативных каналах радиометра. Поля и луга здесь сведены в один тип, так как спектральные характеристики этих типов очень схожи.

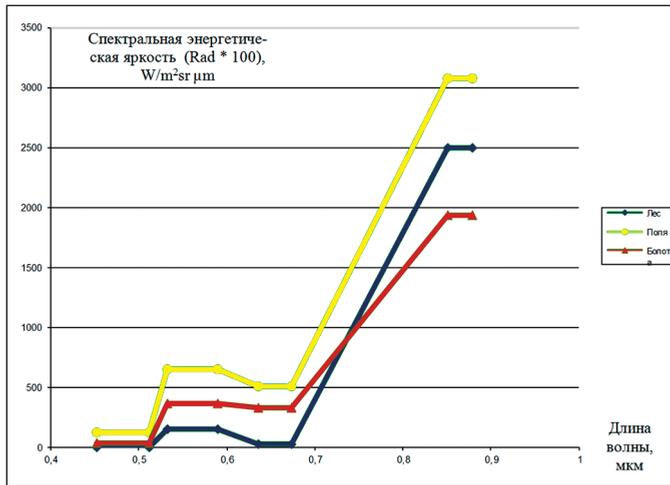


Рис. 2. Спектральные образы типов подстилающей поверхности «Лес», «Поле» и «Болота» для Северо-Западного района, июль–август 2013–2014 гг.

Из рис. 2 видно, что идентифицировать типы «Леса», «Поля/луга» и «Болота» возможно по данным в зелёном (0,525–0,600 мкм), красном (0,630–0,680 мкм), ближнем инфракрасном (0,845–0,885 мкм) каналах, где наблюдаются наибольшие расхождения в спектральной энергетической яркости этих типов.

На втором этапе объектно-ориентированного подхода создавались эталонные выборки для заданных типов (труднораспознаваемых методами автоматической классификации). На рис. 3 приведены примеры гистограмм, полученных для типа подстилающей поверхности «Лес» («Forest») в трех спектральных диапазонах Landsat-8. Статистическое распределение значений спектральной яркости на рис. 4 представлено без проведения атмосферной коррекции снимка. Набор полученных эталонных спектральных характеристик для каждого типа поверхности в виде гистограмм был сохранен в банке данных эталонных признаков. Образцы этого банка данных использовались для дальнейшего проведения классификаций с обучением.

Анализируя примеры для подстилающей поверхности «Лес», приведенные на рис. 3, можно отметить узость гистограмм для каналов 3 и 4 радиометров, что позволяет утверждать значимость именно этих каналов для идентификации лесов в отличие от достаточно широкого по значениям и «размазанного» диапазона ближнего инфракрасного спектра (5 канал радиометра).

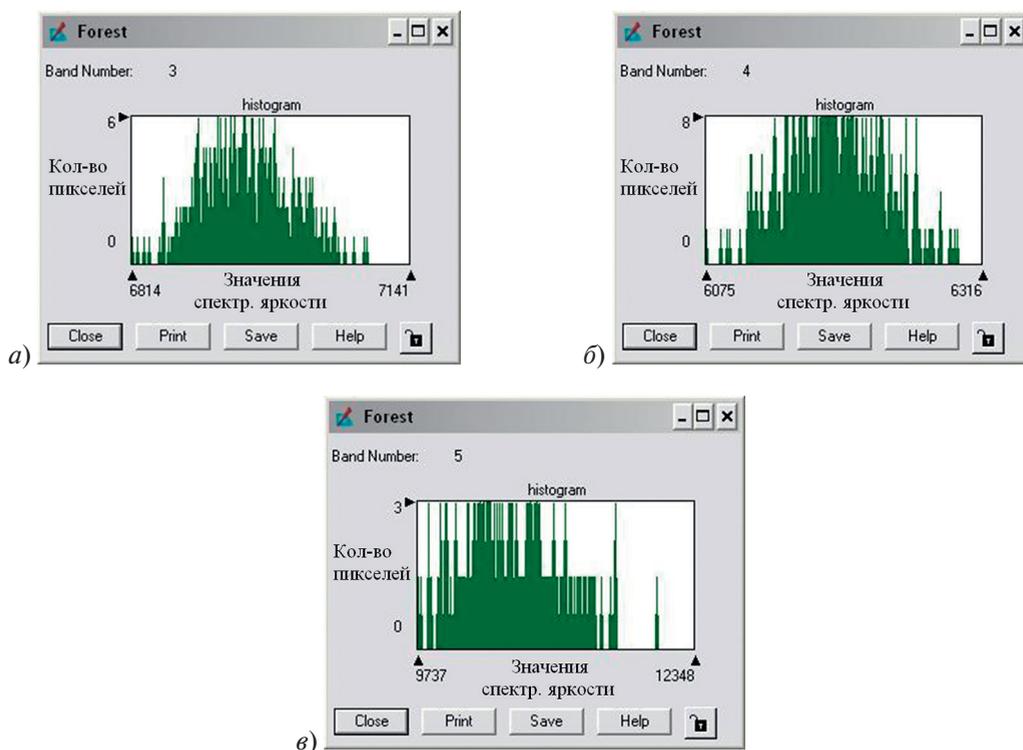


Рис. 3. Гистограммы распределения спектральных яркостей пикселей типа подстилающей поверхности «Лес»: а — зеленый спектр; б — красный спектр; в — ближний инфракрасный спектр

На заключительном этапе формировались эталонные выборки по различным участкам снимков для заданных типов подстилающей поверхности в виде статистических значений. Рассчитывались наборы минимальных, максимальных, средних значений и значений средних квадратических отклонений по конкретным характерным выборкам заданных типов или целиком по участкам снимков. На этом же этапе создавались алгоритмы обработки, включающие в себя состав и последовательность операторов обработки, выбор порогов сегментации изображения, выбор параметров геометрических, вероятностных фильтров для распознавания разных типов поверхностей при помощи ERDAS Imagine. Алгоритмы обработки и статистические наборы также были сохранены в банке данных эталонных признаков. При помощи эталонных спектральных образов проводилась классификация лесов, полей, лугов и водных объектов в осложненных ситуациях при смешивании данных типов подстилающей поверхности после процедуры автоматической классификации водосбора р. Луга.

Как показали результаты проведенной классификации для водосбора р. Луга, тип «Болота» достаточно точно идентифицировался используемыми методами автоматической классификации с добавлением к нему типа поверхности «переувлажненные вырубки леса». Проблемными для автоматического распознавания являлись загрязненные

взвешенными веществами водоемы, которые смешивались с урбанизированными зонами, речные долины (смешивание с лесной зоной), поля (смешивание с лугами). Проблемные ситуации разрешались методом объектно-ориентированного подхода. Также следует отметить, что среднее пространственное разрешение (30 м) КА Landsat-8 недостаточно для определения типов лесов (отделения хвойных лесов от лиственных), а также отделения свалок, карьеров от урбанизированных зон по этим данным.

По результатам выполненной обработки были построены тематические карты, отображающие пространственное распределение целевых классов объектов, а далее проводился визуальный анализ в соответствии с поставленной задачей.

При проведении визуального анализа типов растительности учитывались значения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI). Для расчета вегетационного индекса NDVI использовались данные Landsat-8 в красном (4 канал) и ближнем инфракрасном диапазоне (5 канал). С помощью разработанного программного модуля автоматического расчета индекса NDVI было составлено распределение вегетационного индекса для водосбора р. Луга. Фрагмент растрового изображения устья р. Луга представлен на рис. 4. Специально для Северо-Западного района была разработана цветовая палитра, приведенная на рис. 2,б). В цветовую палитру индекса вегетации входят 12 оттенков зеленого цвета, соответствующих тем или иным классам растительности Северо-Западного района. Карты NDVI использовались как слои геопространственной информации, дополняющие результаты классификации, для принятия решений по идентификации типов заданных поверхностей. Например, в случаях обнаружения вырубок леса с сухим травянистым покровом именно по данным NDVI вырубки относились к типу «Луга». Такие типы подстилающих поверхностей, как «Поля» и «Луга», отличались друг от друга также по значениям индекса вегетации и по геометрии полей.

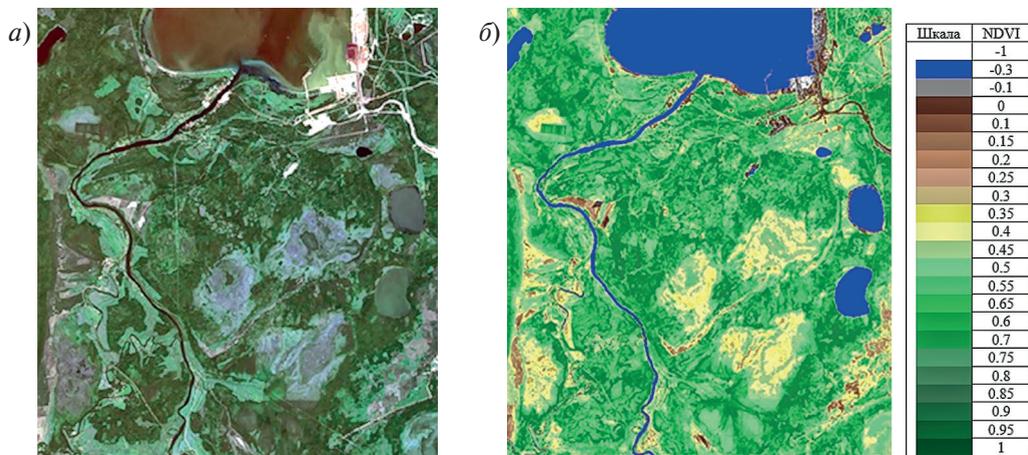


Рис. 4. Фрагмент водосбора р. Луга, Landsat-8, 24.08.2015 (а), индекс вегетации NDVI (б)

В процессе визуального анализа тематических карт привлекалась также вспомогательная информация (топографические карты на территорию водосбора, карты

растительности, данные спутниковой съемки за прошлые годы) и вносились поправки по зонам распространения того или иного типа подстилающей поверхности. Привлечение вспомогательной информации в виде лесоустроительных карт в целом помогает определиться с типом растительности, но часто контуры лесов не совпадают из-за неактуальности карт (на карты не нанесены свежие вырубki, поэтому часто процент лесистости территории завышен).

После проведения визуального анализа строились результирующие карты идентификации заданных типов подстилающей поверхности водосбора (рис. 5). В итоге были рассчитаны площади для всех идентифицированных типов подстилающей поверхности попиксельно в пределах водосбора р. Луги (табл. 1).

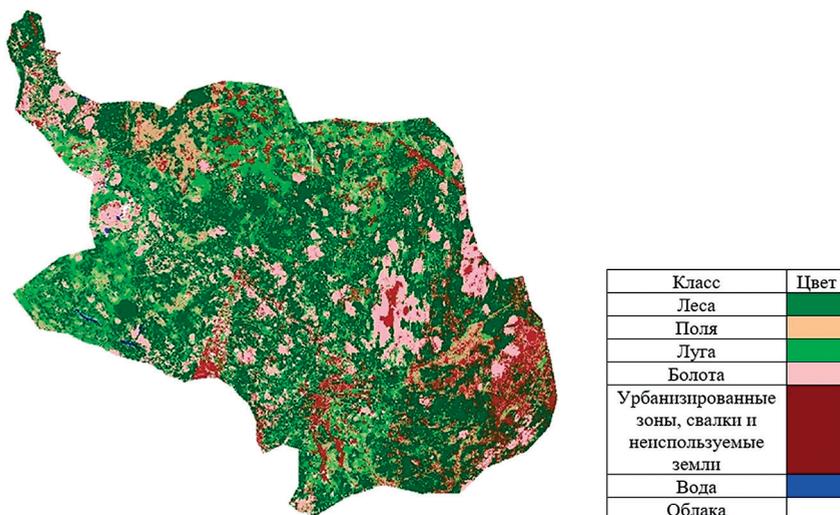


Рис. 5. Типы подстилающих поверхностей водосбора р. Луги

Таблица 1

Площади различных типов подстилающей поверхности водосбора р. Луги, полученные в результате дешифрирования космических снимков

Тип подстилающей поверхности водосбора	Площадь, км ²
Леса	7195,7
Поля	1963,1
Луга	1260,1
Болота	2661,4
Урбанизированные зоны, свалки, заброшенные земли	1396,6
Водная поверхность	263,5

Одним из перспективных направлений практического использования результатов идентификации типов подстилающей поверхности на основе спутниковых снимков

является получение исходной информации для математического моделирования природных систем. Так, приведенные выше значения площадей различных типов подстилающей поверхности на водосборе р. Луги использовались для расчета биогенной нагрузки на акваторию Финского залива, сформированной на этой территории. Основой для выполнения расчетов биогенной нагрузки на Финский залив, сформированной на водосборе р. Луги, послужила модель *ILLM* — *Institute of Limnology Load Model* (свидетельство о гос. регистрации № 2014612519 от 27.02.2014), разработанная в Институте озераведения РАН [3, с. 54] и предназначенная для расчета внешней нагрузки общим азотом и общим фосфором на водные объекты со стороны водосбора. Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах в северо-западном регионе России. Модель верифицирована на ряде объектов, расположенных в северо-западном регионе России: водосборах рек Нева, Великая, Мга, Ижора, Славянка.

Согласно модели рассредоточенная нагрузка общим фосфором $P_{\text{общ}}$ и общим азотом $N_{\text{общ}}$ от естественных и антропогенных ландшафтов L [т/год] формируется за счет эмиссии биогенных веществ из почв, слагающих водосбор. Расчетная зависимость имеет вид: $L = \sum_j C_j u_j A_j / 1000$, где, C_j — средние концентрации биогенного вещества в

стоке с j -го типа подстилающей поверхности, $\text{мг/дм}^3 = \text{г/м}^3$; u_j — слой стока с рассматриваемых типов подстилающей поверхности, мм/год ; A_j — площади рассматриваемых типов подстилающей поверхности, км^2 , определяемые на основе спутниковой съемки. Ориентировочные значения C_j , экспериментально полученные в условиях северо-запада России и востока Финляндии, представлены в табл. 3.

Таблица 2

Концентрации $[\text{мг/дм}^3]$, $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ в первичных звеньях гидрографической сети для различных типов подстилающей поверхности [4, с. 170]

Подстилающая поверхность	Поля и луга	Естественные леса и болота	Урбанизированная территория	Смешанные и заброшенные земли
$P_{\text{общ}}$	0,08	0,05	0,20	0,12
$N_{\text{общ}}$	3,1	0,7	2,3	1,4

Таблица 3

Вынос $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ (т/год) р. Лугой (створ г. Кингисепп) и рассчитанная биогенная нагрузка на Финский залив, сформированная на водосборе Луги

	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
Нагрузка 2012 г. по данным СЗУ Росгидромета	524	4417
Нагрузка 2013 г. по данным СЗУ Росгидромета	137	4086
Рассчитанная по модели нагрузка для средней водности года	269,0	4192,8
Рассчитанная нагрузка с применением НДТ для средней водности года	265,1	4053,1
Рассчитанная фоновая нагрузка для средней водности года	130,8	1823,7

Рассчитанная по модели биогенная нагрузка на Финский залив, сформированная на водосборе р. Луги, составляет 269,0 т *P*/год и 4192,8 т *N*/год (табл. 2). При этом фоновая компонента нагрузки составляет 130,8 т *P*/год и 1823,7 т *N*/год. Сравнение результатов моделирования с данными мониторинга СЗУ Росгидромета на р. Луге (створ г. Кингисепп) показывает удовлетворительное соответствие (табл. 3).

Приведенные данные использовались для оценки суммарной биогенной нагрузки на Финский залив с Российской территории и перспектив ее снижения в соответствии с международными рекомендациями. Работа выполнялась в рамках проекта «Научно обоснованные предложения по установлению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России и определение соответствия нагрузки требованиям Копенгагенской Министерской Декларации ХЕЛКОМ (2013)» по Федеральной целевой программе «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах».

Дальнейшее совершенствование методов количественной оценки выноса биогенных веществ с водосбора связано, прежде всего, с организацией комплексного использования данных контактных методов и дистанционного зондирования. Кроме развития методов идентификации типов подстилающей поверхности на основе спутниковых снимков с ориентацией на последующее использование результатов в задачах оценки выноса веществ с водосборов, необходимо развивать методы и модели, описывающие формирование биогенной нагрузки, а также совершенствовать систему наземного (контактного) мониторинга как совокупность методов измерения, оценки и прогноза.

Литература

1. Герасимов Ю.Ю., Кильпельяйнен С.А., Соколов А.П. Геоинформационные системы: Обработка и анализ растровых изображений. — М.: Дата+, 2002. — 118 с.
2. Григорьев А.Н., Рыжиков Д.М., Тимофеев А.С., Чичкова Е.Ф. Обработка многоспектральной спутниковой информации высокого пространственного разрешения в программной среде ERDAS Imagine, верификация результатов для Северо-Западного региона РФ // Сб. тезисов конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 2012, с. 136.
3. Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология, 2011, № 3–4, с. 50–59.
4. Кондратьев С.А., Максимов Д.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Моделирование биогенной нагрузки на водные объекты // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 35, с. 165–177.
5. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Чичкова Е.Ф., Уличев В.И. Основы методики контроля над объектами накопленного экологического ущерба // «Перспективные направления развития науки в Петербурге» разд. 6.1. — СПб.: Изд-во ИП Пермяков, 2015, с. 253–265.
6. Рыжиков Д.М. Автоматизация дешифрирования космических снимков по эталонному спектральному образу лиственного леса // Сборник докладов Научной сессии ГУАП, ч. II, технические науки. — СПб., 2015, с. 292–297.