

Ж.В. АТУТОВАИнститут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, atutova@mail.ru**АНАЛИЗ ПОСЛЕПОЖАРНОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКИ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ
УРОЧИЩА БАДАРЫ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)**

В работе представлен опыт применения геоинформационных данных в оценке восстановления растительного покрова в сосновых лесах урочища Бадары после прошедших в 2010 г. пожаров. Данному исследованию предшествовал девятилетний период мониторинговых наблюдений за спецификой породного состава древостоя, кустарникового яруса и живого напочвенного покрова на гарях и в незатронутых возгораниями лесах. На основе сформированной базы геоботанических данных рассмотрено их соотношение с показателями вегетационных индексов NDVI и EVI, полученными в результате обработки геоинформационных материалов среднего пространственного разрешения. Были выявлены особенности динамики показателей NDVI и EVI как в пространстве, так и во времени. На гарях в период 2009–2019 гг. отмечена флуктуация значений вегетационных индексов почти в каждой сезонной группе, что соотносится с геоботаническими параметрами, имеющими восходящую динамику данных. В лесах, не затронутых пожарами, а значит находящихся в устойчивых экологических условиях, показатели NDVI и EVI оставались стабильными или имели небольшое колебание на протяжении всего многолетнего периода. Отмечено, что для NDVI характерно завышение значений, особенно в пик вегетации; показатели EVI отличаются большей достоверностью. Разновременный анализ продемонстрировал, что и натурные данные, и показатели NDVI и EVI указывают на успешность протекания процессов лесовосстановления. Однако изучение значений вегетационных индексов не может рассматриваться в качестве самостоятельного источника информации в оценке процессов деградации.

Ключевые слова: вегетационный индекс, NDVI, EVI, гарь, мониторинг, лесовосстановление.

Zh.V. ATUTOVAV.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, atutova@mail.ru**ANALYSIS OF THE POST-FIRE RESTORATION DYNAMICS IN PINE FORESTS
OF THE BADARY TRACT (REPUBLIC OF BURYATIA)**

This paper presents experience of using geoinformation data in the evaluation of vegetation cover restoration in the pine forests of the Badary tract after the fires that occurred in 2010. This study was preceded by a nine-year period of monitoring observations of the specificity of the species composition of the forest stand, shrub layer and living ground cover in burnt areas and in undamaged forests. The correlation of the generated geobotanical database with the vegetation indices NDVI and EVI obtained from processing medium spatial resolution geoinformation material is considered. The features of the dynamics of the NDVI and EVI indicators were identified both in space and in time. In the burnt areas in the period 2009–2019, a fluctuation of the values of vegetation indices was noted in almost every seasonal group, which correlates with geobotanical parameters that show an upward data dynamics. In forests not affected by fires and, hence, in stable ecological conditions, the NDVI and EVI indicators remained stable or showed a small fluctuation throughout the long-term period. It is noted that NDVI is characterized by an overestimation of values, especially at the peak of vegetation, whereas EVI indicators are more reliable. Multi-temporal analysis showed that both field data and NDVI and EVI indicators show the success of reforestation processes. However, the study of the values of the vegetation indices cannot be considered an independent source of information in the assessment of demutation processes.

Keywords: vegetation index, NDVI, EVI, burnt area, monitoring, reforestation.

ВВЕДЕНИЕ

Выдающиеся исследователи биоты Алексей Васильевич Белов и Валерий Федорович Лямкин подчеркивали, что процесс лесовозобновления (в том числе на гарях) отражает стабилизирующую функцию динамики геосистем, необходимую для определения пределов устойчивости к внешним

воздействиям и, как следствие, позволяет дать прогнозную оценку ходу восстановления [1]. Сосновые леса урочища Бадары (Тункинский район, Республика Бурятия) — природный эталон горно-котловинных светлехвойных лесов юга Восточной Сибири, значительная часть которых в настоящее время трансформирована в результате многократного прохождения лесных пожаров. Риск утраты уникальных сосновых боров актуализировал направленность наблюдений, касающихся факторов возникновения, масштабов и последствий огневого поражения ландшафтов урочища [2–4].

Наши исследования охватывают девятилетний период мониторинговых геоботанических наблюдений, позволивших сделать предварительные выводы о перспективах возобновления сосновых лесов исключительно на основании натурных данных [5]. В работе представлен анализ динамики послепожарного лесовосстановления с одновременным применением многолетних рядов полевых геоботанических и дистанционных данных с целью определения потенциала использования геоинформационных материалов в прогнозных оценках перспектив возобновления сосняков ур. Бадары. В качестве индикаторов, способных подтвердить наши прогнозы, выбраны показатели вегетационных индексов (ВИ), характеризующие запас фитомассы как ответную реакцию среды на изменение ландшафтно-экологических условий [6–13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ключевого района исследования выбран краевой участок гари, образованной после прохождения лесного пожара весной 2010 г., — площадка А (рис. 1, а). В ее пределах в период 2014–2020 гг. осуществлялись мониторинговые наблюдения за лесовосстановлением в сосняках ур. Бадары (см. рис. 1, б), подробное описание методов выполнения которых изложено в статье [5]. Для анализа успешности протекания процессов постпожарного восстановления была обозначена территория,



Рис. 1. Ландшафтно-экологическое состояние ключевых участков урочища Бадары.

Площадка А: а — октябрь 2011 г. (фото Е.А. Дюкарева), б — август 2020 г. (фото автора); в — фоновая площадка Б, июнь 2014 г. (фото автора).

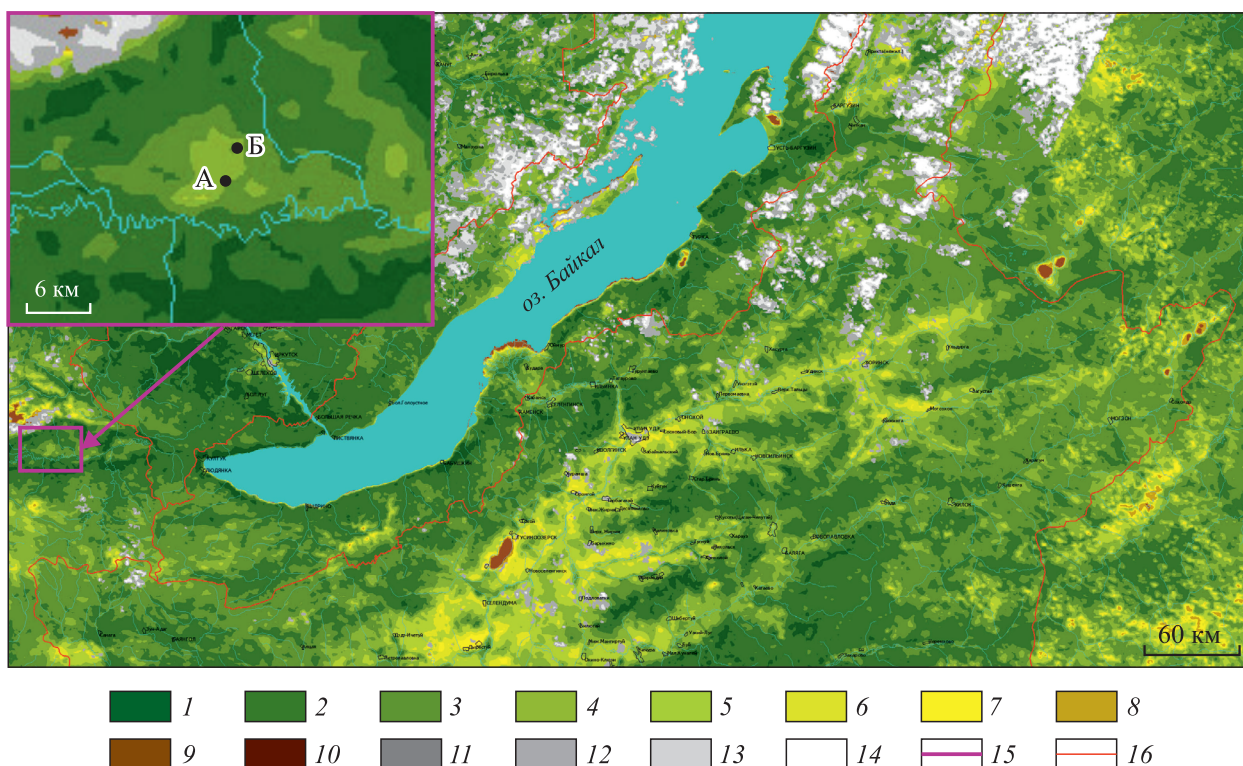


Рис. 2. Пример изображения вегетационного индекса NDVI за десятидневный период для Байкальской природной территории (дата 01.07.2009) [15].

NDVI: 1 — 0,7–1,0; 2 — 0,6–0,7; 3 — 0,5–0,6; 4 — 0,4–0,5; 5 — 0,3–0,4; 6 — 0,3–0,3; 7 — 0,2–0,3; 8 — 0,1–0,2; 9 — 0,04–0,1; 10 — 0,0–0,04. Облачность, %: 11 — 1–20; 12 — 20–60; 13 — 60–90; 14 — 90–100. Границы: 15 — ключевого района, 16 — центральной экологической зоны Байкальской природной территории. А, Б — ключевые участки.

геоботаническая характеристика которой представляет собой эталон возобновления. Это сосновый средневозрастной зеленомошно-травяно-кустарничковый лес, незатронутый недавними возгораниями и находящийся севернее, в 3,3 км от гари — фоновая площадка Б (см. рис. 1, в).

Натурные данные были сравнены с геоинформационными материалами портала sputnik.irk.ru [14], где представлены декадные композиты по безоблачным участкам Байкальской природной территории, характеризующие вегетационные индексы: нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) и усовершенствованный вегетационный индекс (EVI). Базой композитов служат полученные с помощью спектрорадиометра MODIS снимки с пространственным разрешением 1000 м. Нами отобраны представленные в классифицированном виде изображения в формате PNG (рис. 2) с 01.01.2009 (за год до прохождения пожара пределах ключевого участка исследований) по 16.07.2019 (дата последнего размещенного на портале изображения).

Для каждого года анализировались изображения NDVI и EVI, полученные 1 января, 30 апреля, 1 июля и 30 сентября, т. е. в периоды начала, пика и конца вегетации, а также рассматривались зимние изображения с целью идентификации хвойных насаждений. Кроме того, принимались во внимание изображения, соответствующие датам рекогносцировочных и натурных геоботанических наблюдений. В целом было рассмотрено 95 геоинформационных продуктов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При интерпретации величин ВИ использовалась шкала показателей, зависящих от сезонов года: летние значения NDVI и EVI характеризуют степень развития зеленой биомассы при ее наличии, зимние — плотность покрытия хвойными лесами [7]. В летний период показатели в интервале 0,04–0,2 указывают на отсутствие растительности, 0,2–0,3 — на низкую степень развития зеленой биомас-

Таблица 1

Показатели вегетационного индекса NDVI ключевого района урочища Бадары

Год	Площадка А (гарь)				Площадка Б (фон)			
	01.01	30.04	01.07	30.09	01.01	30.04	01.07	30.09
2009	0,2–0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	0,3–0,4	0,1–0,2	0,3	0,6–0,7	0,3–0,4
2010	»	»	»	»	»	»	0,5–0,6	»
2011	0,1–0,2	0,3	0,3–0,4	0,3	»	»	»	»
2012	»	»	0,5–0,6	»	»	»	»	»
2013	0,04–0,1	0,2–0,3	0,4–0,5	»	»	»	»	»
2014	0,1–0,2	0,3	»	0,3–0,4	»	»	»	»
2015	»	»	»	»	»	»	»	»
2016	0,04–0,1	»	»	»	»	»	»	»
2017	0,1–0,2	»	»	»	»	»	»	»
2018	»	0,3–0,4	0,5–0,6	0,4–0,5	»	»	»	0,4–0,5
2019	0,2–0,3	»	»	Нет данных	»	»	»	Нет данных

сы, 0,3–0,6 — на среднюю степень развития, более 0,6 — на высокую степень развития зеленой биомассы. В зимний период значения 0,04–0,2 говорят об отсутствии хвойной растительности (в том числе из-за снежного покрова), 0,2–0,25 указывают на то, что плотность покрытия хвойными лесами составляет 10 %, 0,25–0,3 — 20, 0,3–0,35 — 30, ..., 0,8–0,9 — 100 %.

На фоновой территории заметна стабильность данных NDVI для каждой фазы вегетации в течение всего периода наблюдений (табл. 1). Значения зимних показателей указывают на заснеженность. Для начала вегетационного периода ежегодно характерен индекс, интерпретируемый как низкая степень развития фитомассы. Однако натурные наблюдения выявили высокое значение сомкнутости крон сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) (0,8), средняя высота которой составила 15 м (см. рис. 1, в). Средние высоты кустарников варьировали от 15–25 см до 40–60 см. Низкие значения ВИ при высоких показателях сомкнутости древостоя в пределах фоновой территории свидетельствуют о том, что либо ВИ не чувствительны к древесному ярусу растительности [16], либо интерпретация значений NDVI и EVI должна производиться с учетом эколого-географических особенностей развития биоценозов для каждой конкретно изучаемой территории [6, 11].

В пик вегетации и по ее завершении NDVI держался на уровне, указывающим на среднюю степень развития фитомассы, что можно считать соответствующим реальной природной обстановке. В ходе полевых наблюдений отмечен скудный напочвенный покров, проективное покрытие которого не превышало 30 %. Травянистые растения встречались рассеянно, в небольшом количестве.

Показатели EVI для фоновой территории в начале и по завершении вегетационного периода зафиксированы на уровне отсутствия растительности, а в середине — на уровне средней степени развития (табл. 2). Возможно, низкие значения обусловлены высокой сомкнутостью древостоя, препят-

Таблица 2

Показатели вегетационного индекса EVI ключевого района урочища Бадары

Год	Площадка А (гарь)				Площадка Б (фон)			
	01.01	30.04	01.07	30.09	01.01	30.04	01.07	30.09
2009	0,04–0,1	0,1–0,2	0,2–0,3	0,04–0,1	0,04–0,1	0,04–0,1	0,3–0,4	0,04–0,1
2010	»	»	0,1–0,2	»	»	0,1–0,2	»	0,1–0,2
2011	»	0,04–0,1	»	»	»	»	»	»
2012	»	0,1–0,2	»	»	»	»	»	0,04–0,1
2013	»	0,04–0,1	»	»	»	0,04–0,1	»	»
2014	»	»	0,2–0,3	»	»	»	»	0,1–0,2
2015	»	»	0,1–0,2	»	»	0,1–0,2	»	»
2016	»	0,1–0,2	0,2–0,3	»	»	»	»	»
2017	»	»	»	»	»	»	»	0,04–0,1
2018	»	»	»	0,1–0,2	»	»	»	0,1–0,2
2019	»	»	0,3	Нет данных	»	»	»	Нет данных

ствующего обильному развитию травяного покрова. Январские данные указывали на заснеженность территории. В целом результаты подтверждают, что для территорий распространения хвойных присущ небольшой разброс значений ВИ и постоянный ход [11].

На выгоревшей площадке величины NDVI и EVI демонстрируют флуктуационную изменчивость. За год до пожара показатели NDVI в течение периода вегетации указывали на среднюю степень развития зеленой биомассы. Отмечено, что в год прохождения пожара все значения NDVI были аналогичны данным предыдущего года, что оправдано для допожарных январских и апрельских показателей, но труднообъяснимо для высоких значений в начале июля и конце сентября, т. е. для свежих гарей. В ходе рекогносцировочного обследования площадки А в октябре 2011 г. через год после прохождения пожара отмечено сохранение на корню основной части древостоя (см. рис. 1, а). Травяной сухостой свидетельствовал о возобновлении напочвенного покрова.

Значения EVI за год до пожара и в год его прохождения были аналогичны, за исключением июльских, т. е. были зафиксированы изменения, вызванные возгоранием 2010 г. В 2011 г. показатель NDVI на дату обследования (13.10.2011) указывал на низкую степень развития зеленой биомассы, EVI — на ее отсутствие, что в целом совпадает с реальностью. В сентябре 2012 г. наблюдалось активное усыхание и падение деревьев. Как и годом ранее, значения NDVI и EVI соответствовали природному состоянию (низкая степень развития растительности, открытая почва). В июне 2013 г., несмотря на начало вегетации и невысокие показатели высоты травостоя (15–20 см), а также его низкое проективное покрытие (20 %), значения NDVI указывали на среднюю степень развития растительности. EVI с величинами верхних пределов интервала отсутствия растительности можно считать более соответствующими реальной картине.

В июне 2014 г. отмечено возобновление березы повислой (*Betula pendula*), в виде редких экземпляров зафиксированы годовые всходы сосны обыкновенной. Проективное покрытие травяного покрова составило 40–50 %. Значение NDVI указывало на среднюю степень развития растительности, величина EVI (отсутствие растительности) — более реалистична. Повышение значений NDVI в середине вегетационного периода свидетельствует о влиянии увеличения проективного покрытия травостоя, что подтверждается снижением показателей ВИ по завершении вегетации. В июле 2016 г. на гари наблюдались обильные всходы сосны обыкновенной. Проективное покрытие древесного подроста составляло 20–30 %, напочвенного покрова — 50–60 %. NDVI соответствовал средней степени развития зеленой фитомассы, EVI был более близок к геоботаническим показателям — низкая степень развития. В июле 2017 г. незначительно увеличилось обилие кустарников. Проективное покрытие древесного подроста составило 30–40 %, напочвенного покрова — 50–60 %. Несмотря на небольшое увеличение геоботанических параметров, показатели ВИ остались на уровне прошлых лет. Значения NDVI по-прежнему оставались завышенными.

В июле 2018 г. отмечено увеличение средней высоты соснового подроста; проективное покрытие оценивалось в 40–50 %. Обилие, средняя высота и проективное покрытие кустарников увеличились. Показатели проективного покрытия травостоя остались на уровне прошлых лет, однако значения ВИ увеличились — NDVI был в верхних пределах интервала средней степени развития зеленой биомассы, EVI — в нижних пределах. Возможно, это связано с увеличением проективного покрытия соснового подроста и обилия кустарников.

В июле 2019 г. значения NDVI соответствовали верхним пределам интервала средней степени развития зеленой биомассы, EVI — верхним пределам низкой степени. База геоизображений вегетационных индексов после 16.07.2019 не пополнялась. Геоботанические наблюдения в 2019 г. не проводились. Годом позже, в августе 2020 г., на гари отмечено увеличение средней высоты соснового подроста до 1,5 м (см. рис. 1, б). Увеличилось проективное покрытие кустарникового и травяного ярусов — до 30 и 70 % соответственно. В отсутствие данных вегетационных индексов, ориентируясь на геоботаническое обследование, состояние растительности можно соотнести с нижними границами интервала средней степени развития фитомассы.

Разновременный ход значений ВИ для гари демонстрирует прогрессирующую динамику показателей NDVI и EVI в сторону восстановления уровней, характерных для периода, предшествующего возгоранию. При этом отмечено, что величины ВИ на завершающем этапе наблюдений были равны или даже превышали допожарные. Например, июльские значения индексов в допожарном 2009 г. для площадки А со средневозрастными сосняками и скудным травяным покровом были ниже показателей для безлесной выгоревшей территории с развитым травостоем и часто встречающимся древесным подростом в 2019 г. Это можно считать подтверждением отсутствия или очень слабой чувствитель-

ности ВИ к древесной растительности. Однако зимние величины NDVI для гари за весь период наблюдений демонстрируют нестабильность, что все-таки может свидетельствовать о возможности идентифицировать древесный ярус с помощью показателей ВИ.

Июльские значения NDVI не отражают чувствительность к смене экологических условий, вызванных пожаром. В ходе анализа 11-летних данных (см. табл. 1) отмечено небольшое снижение показателей только через год после пожара. Для свежих гарей значения были равны прошлогодним, а в 2012 г. и вовсе превышали допожарный индекс. Скорее всего, имеет место связь индекса с климатическими условиями.

Основываясь на данных натурных наблюдений, отмечено, что более реалистичную картину отражает EVI, значения которого чувствительны к сигналу вегетирующей растительности в районах с высоким уровнем растительной биомассы [8, 10, 12, 17]. Реагируя на смену растительных сообществ в ходе естественного развития, возгорания и последующего лесовосстановления, показатели EVI демонстрируют колебание значений в весенний и летний периоды. Восприимчивость этого показателя к естественным природно-климатическим условиям отражают весенние и осенние данные фоновой территории. Если июльские величины остаются стабильными на протяжении 2009–2019 гг., то в межсезонье заметна их неустойчивость.

В целом о благонадежности лесовосстановления должна свидетельствовать многолетняя устойчивая стабильность значений вегетационных индексов во все сезоны вегетации, что подтверждают показатели фоновой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ динамики лесовосстановления на гарях ур. Бадары с применением данных NDVI и EVI, полученных на базе геоинформационных материалов с пространственным разрешением 1000 м, позволяет сделать вывод о том, что использование ВИ в качестве основного инструмента при анализе нарушенных территорий спорно. Не всегда их значения совпадают с реальной природной обстановкой. Участок геоизображения с определенным показателем ВИ при натурном исследовании может относиться к различным ландшафтным комплексам, поэтому для каждой отдельно взятой территории со своими ландшафтными особенностями требуется корректировка и индивидуальное ранжирование значений ВИ. Также нет уверенности в том, что экстраполяция данных на территории-аналоги покажет объективную ситуацию лесовосстановления на пирогенно трансформированных территориях. Остался нерешенным вопрос чувствительности геоданных среднего пространственного разрешения к древесной растительности.

В целом синтез натурных и геоинформационных материалов является информативным методом исследования трансформированных территорий. С привлечением метеорологических данных дальнейшие исследования могут способствовать пониманию реакции среды (через значения ВИ) на изменения природных условий, например, климатических явлений как таковых или климатических флуктуаций, обусловленных антропогенным воздействием (гари, вырубки, рекреационные нагрузки, промышленное освоение и т. п.).

Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (AAAA-A21-121012190017-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А.В., Лямкин В.Ф., Соколова Л.П. Картографическое изучение природы. — Иркутск: Изд-во «Облмашинформ», 2002. — 160 с.
2. Ахаржанова Т.В. Сосновый бор Бадары — особо ценный ландшафт Тункинского национального парка // Вестн. Бурят. ун-та. Сер. 3. География, геология. — 2004. — Вып. 3. — С. 207–212.
3. Иванько Я.М., Лазарева А.А., Столпова Ю.В. Моделирование изменчивости характеристик пожаров на территории национального парка «Тункинский» // Вестн. Красн. аграр. ун-та. — 2017. — № 7. — С. 44–50.
4. Лехатинов А.М., Лехатинова Э.Б. Состояние лесов и краснокнижных видов сосудистых растений Тункинской долины // Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее: Материалы Второй междунар. конф. (20–24 сентября 2010 г.). — Горно-Алтайск: РИО ГАТУ, 2010. — С. 201–206.

5. **Атутова Ж.В.** Постпирогенное восстановление подтаежных светлохвойных геосистем Тункинской котловины, Юго-Западное Прибайкалье (на примере сосновых лесов урочища Бадары) // Геогр. вестник. — 2022. — № 4 (63). — С. 6–18.
6. **Братков В.В., Атаев З.В.** Вегетационные индексы и их использование для картографирования горных ландшафтов Российского Кавказа // APRIORI. Сер. Естественные и технические науки. — 2017. — № 1. — С. 3–23.
7. **Гребень А.С., Красовская И.Г.** Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга, применительно к зерновым культурам степной зоны Украины // Наукотехнический журнал. — 2013. — № 1 (7). — С. 105–119.
8. **Дунаева Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Ёлкина Е.С., Барботкина Е.С., Вечерков В.В., Барталев С.А.** Использование данных дистанционного зондирования для ранней диагностики наступления засушливых условий // Таврический вестн. аграр. науки. — 2019. — № 4 (20). — С. 28–45.
9. **Лобанов Г.В., Чарочкина А.Ю., Авраменко М.В., Дроздов Н.Н.** Ландшафтная интерпретация различий сезонной динамики вегетационного индекса EVI поверхности пахотных земель Брянской области // Вестн. Северо-Восточ. федерал. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2020. — № 3 (19). — С. 25–35.
10. **Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В.** Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах // Тр. БГТУ. — 2015. — № 1 (174): Лесное хоз-во. — С. 36–40.
11. **Раджабова Р.Т., Алексеенко Н.А., Курамагомедов Б.М., Тажудинова З.Ш., Султанов З.М.** Использование индексных изображений при дешифрировании растительного покрова Внутригорного Дагестана // Юг России: экология, развитие. — 2020. — Т. 15, № 4. — С. 126–136.
12. **Ba R., Song W., Lovullo M., Zhang H., Telesca L.** Informational analysis of MODIS NDVI and EVI time series of sites affected and unaffected by wildfires // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2022. — Vol. 604. — P. 127911.
13. **Zongmei L., Zengxiang Z., Xiaoli Z., Xiao W., Qingke W., Lijun Z.** Forest restoration assessment based on NDVI from MODIS image under different burn intensity in the burned blank in discontinuous permafrost area of Northeast China // Proceedings of the 2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013). — Nanjing, China: AISR, 2013. — P. 366–369.
14. **Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс].** — <http://sputnik.irk.ru> (дата обращения 16.01.2023).
15. **Индекс растительности NDVI (10 дней) [Электронный ресурс].** — <http://www.-geol.irk.ru/dzz/bpt/ndvi10/090701/all.htm> (дата обращения 16.01.2023).
16. **Родионова Н.В., Вахнина И.Л., Желибо Т.В.** Оценка динамики послепожарного состояния растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край) по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2 // Исследование Земли из космоса. — 2020. — № 3. — С. 14–25.
17. **Lijun Z., Zengxiang Z., Tingting D., Xiao W.** Application of MODIS NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis // Transactions from the Chinese Society of Agricultural Engineering. — 2008. — Vol. 24. — P. 167–172.

Поступила в редакцию 18.05.2023

После доработки 07.08.2023

Принята к публикации 11.10.2023