

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ СПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

А. Э. Коротаева¹, М. А. Пашкевич¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Деятельность горнопромышленного сектора приводит к изменению и нарушению как земной поверхности, так и недр. Открытая и подземная добыча полезных ископаемых сопровождается образованием твердых, жидких и газообразных отходов производства. Попадание загрязняющих веществ в поверхностные водоемы, их рассеивание в атмосфере и миграция в почве обуславливают появление или обострение экологических проблем на определенной территории. Поэтому возникает необходимость принятия средозащитных мер для минимизации негативного воздействия горнопромышленных предприятий. В последнее время большое внимание уделяется применению цифровых технологий для решения проблем различного характера. Одной из перспективных областей их применения является добывающая и перерабатывающая промышленность. Быстро развивающиеся цифровые технологии используются для разведки полезных ископаемых, установления загазованности атмосферы, картирования территории. Загрязнение сточных вод горных предприятий азотными соединениями является экологической проблемой, вызывая эвтрофикацию и ухудшение органолептических свойств водоемов. Применение определенных видов растительности в системе очистки может увеличить эффективность удаления соединений азота. Однако для поддержания высокого процента эффективности очистки необходимо проводить мониторинг растений. Спектральная съемка при помощи гиперспектральной или мультиспектральной камер позволяет решать поставленную задачу. Полученные спектры при правильной дешифровке дают базу для расчета вегетационных индексов. Данные индексы применяются для построения растровых изображений, которые показывают концентрацию азота в биомассе растений, проективное покрытие, структуру растительного покрова. Проведение спектральной съемки возможно благодаря использованию беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Мобильность аппаратов такого типа позволяет осуществлять оперативную съемку растительности и своевременно корректировать условия эксплуатации.

Ключевые слова: спектральная съемка, гиперспектральная камера, мультиспектральная камера, беспилотный летательный аппарат, цифровые технологии, цифровизация недропользования, вегетационные индексы, азотные соединения, загрязнение сточных вод, биологическая очистка.

Для цитирования: Коротаева А. Э., Пашкевич М. А. Применение данных спектральной съемки для экологического мониторинга водной растительности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–2. – С. 231–244. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_231.

Spectrum survey data application in ecological monitoring of aquatic vegetation

A. E. Korotaeva, M. A. Pashkevich

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Mining activities result in damages and transformations both at the ground surface and in the subsoil. Open-pit and underground mining is accompanied by the formation of solid, liquid and gaseous waste. The ingress of pollutants into surface water bodies, their dispersion in the atmosphere and migration in soil causes initiation or aggravation of the environmental problems in certain areas. Therefore, it becomes necessary to decide on the environmental protection measures to minimize the negative impact of the mining industry. In recent years, much attention has been paid to the use of digital technologies to solve various problems. One of the promising areas of digital technology application is the mining and processing industry. The rapidly developing digital technologies are used in exploration of minerals, determination of atmospheric gas pollution and in territory mapping. Pollution of mining wastewater with nitrogen compounds is an environmental problem which causes eutrophication and deterioration of the organoleptic properties of water bodies. The use of certain vegetation species in water treatment can increase efficiency of removal of nitrogen compounds from water. In order to maintain high treatment efficiency, it is necessary to monitor vegetations. Spectral imaging with hyperspectral or multispectral cameras allows handling this problem. The obtained spectra, if correctly interpreted, provide the basis for calculating the vegetation indexes. These indexes are used to construct raster images that show the concentration of nitrogen in plant biomass, the projected cover and the vegetation structure. Spectral photography is possible thanks to the use of unmanned aerial vehicles (UAVs). The mobility of these devices enables real-time survey of vegetation and timely adjustment of operating conditions.

Key words: spectrum survey, hyperspectral camera, multispectral camera, unmanned aerial vehicle, digital technologies, subsurface management digitalization, vegetation indexes, nitrogen compounds, wastewater pollution, biological treatment.

For citation: Korotaeva A. E., Pashkevich M. A. Spectrum survey data application in ecological monitoring of aquatic vegetation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):231–244. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_231.

Введение

Процесс добычи полезных ископаемых сопровождается серьезным вмешательством в природные экосистемы. Разработка месторождений подземным и в особенности открытым способами сопровождается значительным воздействием на недра (геологическую среду) вследствие изъятия из них минеральных образований.

В зависимости от производимого влияния можно выделить несколько групп возможного воздействия:

1 группа — снижение общего количества полезного ископаемого в недрах в результате его добычи;

2 группа — воздействия, связанные с изменением или нарушением геологической среды;

3 группа — различные виды загрязнения геологической среды (механическое, химическое, бактериологическое и прочее);

4 группа — воздействия, обусловленные комплексным действием вышеперечисленных групп.

Добыча на горнопромышленных предприятиях может осуществляться несколькими способами, в зависимости от условий и характеристики месторождения, а именно механическим, взрывным, гидродинамическим способами и скважинной геотехнологией в различных ее модификациях. Применение того или иного способа сопровождается определенными экологическими последствиями.

К примеру, добыча твердых полезных ископаемых механическим или взрывным способами обуславливается не только прямым вторжением в недра, нарушением почвенного покрова, но и образованием отвалов пустой породы и терриконов. Их поверхность подвержена сильному пылению мелкодисперсных частиц, которые при ненадлежащих мерах защиты на предприятии, могут распространяться на значительное расстояние. Подземная разработка месторождений сопровождается возникновением трещин в горных породах, проседанием земной поверхности и обвалами. Помимо этого, подземные выработки могут нарушать водные горизонты на разрабатываемой территории, что ведет к частичному или полному затоплению выработок подземными водами, а также загрязнению последних [1]. Попадание загрязненных, особенно тяжелыми металлами, подзем-

ных вод в вышележащие водоносные горизонты или поверхностные водные объекты может привести к ухудшению здоровья людей и сокращению продолжительности жизни [2].

В связи с ускоренными темпами развития производственных мощностей в горнопромышленном секторе в настоящее время увеличивается доля низко rentабельных месторождений и трудноизвлекаемых полезных ископаемых, а также уменьшается концентрация полезного компонента в связи с отработкой основных месторождений минеральных ресурсов [3]. Поэтому существует необходимость как усовершенствования применяемых технологий добычи и обогащения, так и внедрения новейших разработок и методов работы [4].

Одним из перспективных направлений для ускорения технологического развития на данный момент считается цифровизация. Понятие «цифровизации» вытекает из термина «цифровая экономика», который был впервые озвучен в Германии в 2011 году. Цифровая экономика подразумевает переход экономики на автоматизированные сервисы и производства путем интегрирования в них цифровых технологий. В настоящее время они представлены внушительным перечнем методов и концепций, таких как искусственный интеллект, 3D-печать, цифровые двойники и многое другое (рис. 1) [5, 6].



Рис. 1. Разновидности сквозных цифровых технологий

Fig. 1. Varieties of cross-cutting digital technologies

Примечание. Рисунок составлен на основе данных [5]

Экологические проблемы недропользования

Изъятие минеральных ресурсов из недр в зависимости от угла рассмотрения сопровождается проблемами социального, экономического и экологического характера.

Экономические проблемы определяются убытками и упущенной выгодой. Убытки возникают при недостоверной информации различного вида изысканий о месторождении, сверхнормативной потере полезного ископаемого или повреждении имущества предприятия. Упущенная выгода проявляется в нерациональной разработке месторождений, а также в предоставлении государством горнопромышленному предприятию ограниченной и неудовлетворительной геологической информации.

Социальный ущерб определяется влиянием работы предприятия на физическое и психологическое здоровье населения. Однако определение социального ущерба сопровождается некоторыми сложностями. В определенных районах, особенно с развитой промышленностью и инфраструктурой, трудно выделить влияние определенного предприятия. Социальный ущерб в таком случае должен выявляться на основе глубоких исследований работы предприятия минерально-сырьевого сектора.

В настоящее время все больше внимания уделяется экологическому аспекту недропользования. Как было сказано выше, отработка месторождений сопряжена с вмешательством в природные экологические системы, что приводит к экологическому ущербу. Данный вид ущерба может быть разделен на 3 группы.

1 группа — ущерб, возникающий при несвоевременном закрытии или консервации горнопромышленного предприятия в связи с сокращением запасов месторождения;

2 группа — ущерб, вызванный нарушением природной среды в результате добычи полезного ископаемого. В результате деятельности предприятия на территории горного отвода может снижаться продуктивность или происходить отчуждение сельскохозяйственных земель;

3 группа — ущерб, обусловленный попаданием в воздушную, водную и почвенную среды загрязняющих веществ. Данные вещества образуются на всех этапах жизненного цикла предприятия, и при несоблюдении экологических нормативов на предприятии могут негативно воздействовать на био-, фито- и зооценозы [1]. Данный вид ущерба может оцениваться при помощи способа специфического повреждения, методом обобщенных косвенных оценок и методом прямого расчета [7];

4 группа — ущерб, возникающий при сочетании условий из вышеперечисленных групп [1].

Целью статьи является рассмотрение применения цифровых технологий для экологического мониторинга водной растительности, которая используется для очистки сточных вод от азотных соединений. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: описать пути попадания соединений азота в поверхностные водотоки; определить метод очистки сточных вод от данных загрязнений; предложить и проанализировать разновидность цифровой технологии, которая может использоваться для проведения экологического мониторинга.

Проблема загрязнения поверхностных водотоков азотными соединениями

Отработка месторождений открытым способом с применением буров-

зрывных работ, которые осуществляются при помощи взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры (нитрат аммония), приводит к образованию большого объема сточных вод, загрязненных азотными соединениями. Содержание азота во взрывчатых веществах может варьироваться от 20 % до 33 % (по весу) [8]^{Cu(2+}.

В процессе эксплуатации карьера в связи с поступлением в выработку атмосферных осадков и подземных вод образуются карьерные воды, которые подвергаются загрязнению различными химическими веществами, в том числе и азотными соединениями. Причиной попадания данных веществ в карьерные воды могут стать потери взрывчатого вещества в процессе его транспортировки внутри карьера и зарядки в скважины. Азотные соединения поступают в воды в результате растворения нитрата аммония при зарядке обводненных скважин. Помимо этого, соединения азотной группы могут попасть в карьерные воды при их вымывании из горных пород, сорбирующих оксиды азота при проведении взрывов. Непрореагировавшие частицы взрывчатого вещества могут сорбироваться на поверхности горной породы и в процессе растворения пополнять образующиеся карьерные воды [9,10].

Основная опасность поступления азота в поверхностные водоемы связана с развитием процесса эвтрофикации, который негативно влияет на жизнедеятельность живых организмов. Данный процесс приводит к изменению температурного и кислородного режимов водоема, а также изменению цветности и органолептических показателей [11]. Наличие нитратов в водоемах приводит к бурному разрастанию растительности и к их дальнейшей гибели. Кроме того, преобразуясь в водотоках

в нитритную форму, нитраты могут негативно воздействовать на сердечно-сосудистую и нервную системы человека при использовании воды из такого водоема для жизнедеятельности [12].

Очистка карьерных сточных вод будет производиться на существующих гидросооружениях горнопромышленных предприятий путем внедрения биологической доочистки. Предлагается применять систему сконструированных водно-болотных угодий (constructed wetlands), которая обеспечивает комплексную очистку от загрязняющих веществ.

Constructed wetlands являются искусственно сконструированными болотными экосистемами. В этих системах в процесс очистки вовлечены болотная растительность, почвы и естественные микробные сообщества [13,14] soil impoverishment and accumulation of waste. The mining-associated processes are the cause of pollution of air (emissions of equipment and machine. Следует отметить, что главную роль в процессах трансформации азотных соединений играют нитрифицирующие и денитрифицирующие бактерии [15,16].

Помимо бактерий, большое значение в процессе очистки имеет высшая растительность (макрофиты). Наиболее используемыми растениями являются *Phragmites australis* (тростник обыкновенный), *Typha latifolia* (рогоз широколиственный), *Scirpus species* (виды камыша), *Carex species* (виды осоки) и *Elodea Canadensis* (элодея канадская) [15,17–20]. Основная роль макрофитов заключается в создании условий для микроорганизмов в корневой зоне с увеличением тем самым эффективности химических и биохимических процессов и, следовательно, очистки. Также растительность выступает в качестве ассимиляторов загрязняющих веществ в свои ткани.

Для очистки карьерных сточных вод от соединений азота предлагается комплексное использование нескольких групп макрофитов:

- укореняющихся на суше с надземными вегетативными и генеративными частями — *Phragmites australis*;
- укореняющихся в воде и полностью погруженных в воду — *Elodea Canadensis*.

На протяжении первых месяцев после высаживания растений на территорию гидротехнического сооружения для проведения биологической очистки, а также в течение теплого периода года необходимо проводить систематические наблюдения за их развитием. Растительность динамично развивается и изменяется, обладает сезонными и возрастными характеристиками. Поэтому получение информации о резком увеличении биомассы или внезапном увядании способствует оперативному принятию мер по предотвращению негативных последствий. Например, при обнаружении засыхания или пожелтения растений можно произвести их замену на новые экземпляры или же выявить причину этого события и локализовать ее. Наблюдение за качественными и количественными характеристиками применяемых групп макрофитов предлагается осуществлять при помощи спектральной съемки на базе беспилотного летательного аппарата с последующим вычислением вегетационных индексов.

Применение аппаратов спектральной съемки на базе БЛА

Как известно, состояние растительности можно оценить по спектрам отраженного излучения. Получение данных спектров обусловлено различным поглощением излучения разных длин волн биологическими пиг-

ментами, в частности хлорофиллом. В связи с тем, что концентрация пигментов в клетках и тканях растений и уровень влагообеспеченности параллельно изменяются с физиологическим состоянием растительности, данные показатели характеризуют здоровье растений [21 – 24].

Спектральная съемка осуществляется мультиспектральными и гиперспектральными камерами и широко применяется в сельском хозяйстве при выявлении заболеваемости растений, оценке урожайности и состояния плодов и корнеплодов, а также оценке состояния почв [22, 25 – 29]. В основе мультиспектральной и гиперспектральной съемки лежит сбор данных из различных участков электромагнитного спектра. Тот факт, что различные типы растительности характеризуются собственной отражательной способностью, помогает их классифицировать [30].

Спектральное разрешение определяет качество снимков, полученных при помощи мультиспектральных и гиперспектральных камер, и обуславливается шириной каждой полосы спектра и количеством спектральных каналов. Количество последних может достигать 4 – 30 в случае мультиспектрального изображения и достигать до 1000 для гиперспектрального. В виду этого гиперспектральные камеры являются более чувствительными к изменению характеристик растений, обеспечивая практически непрерывную спектральную кривую [27, 30, 31].

Для решения поставленных в работе задач возможно использование спектральной съемки при помощи мониторингового комплекса, являющегося частью материально-технического оснащения научно-образовательного центра коллективного пользования

Таблица 1
Технические характеристики БЛА
Specification of UAV

Наименование	Значение
Дальность действия аппарата, км, не менее	10
Максимальная высота подъема аппарата, км, не менее	600
Максимальная скорость горизонтального полета, км/ч, не более	60
Время непрерывной работы от бортовой системы электроснабжения, ч, не менее	1
Допустимая взлетная масса, кг, не более	35
Внешние факторы среды при эксплуатации <ul style="list-style-type: none"> • освещенность на территории исследования, лк • температура окружающей среды, °С • атмосферное давление, кПа • относительная влажность воздуха, % • атмосферные осадки (дождь, снег) с интенсивностью, мм/ч 	≥ 4 0 – +35 84,0 – 106,7 5 – 95 ≤ 2

Примечание. Таблица составлена на основе данных [32 – 34]

высокотехнологичным оборудованием «Центр коллективного пользования» (ЦКП) Санкт-Петербургского горного университета. Данный комплекс состоит из малогабаритного беспилотного летательного аппарата вертолетного типа (мБЛА-ВТ) со встроенным набором навесного оборудования, способным работать в автоматическом и полуавтоматическом режимах и наземной станции управления.

Минимальные технические характеристики мБЛА-ВТ при использовании их в составе комплекса приведены в табл. 1 [32 – 34].

Использование беспилотного летательного аппарата для аэрофотосъемки характеризуется рядом достоинств, а именно возможностью выбора даты проведения полетов и их высоты, мобильностью аппарата и отсутствием влияния физических характеристик атмосферы.

Предлагается использовать гиперспектральную камеру Specim IQ или мультиспектральную камеру Sequoia Parrot, которые уже зарекомендовали себя при проведении съемки для сельского хозяйства [26, 35]. Данные камеры

характеризуются малыми размерами и массой, что позволяет беспрепятственно прикрепить их к беспилотному летательному аппарату. Соединение с камерами может осуществляться при помощи различных устройств (портативные устройства, Wi-Fi или USB) [35].

Спектральные вегетационные индексы

Состояние растительности, применяемой для очистки сточных вод от азотных соединений, будет оцениваться на основе вегетационных индексов, расчет которых производится согласно данным спектральной съемки [36].

К настоящему времени существует порядка 160 индексов, рассчитываемых по широким и узким спектральным зонам. В большинстве случаев спектральные вегетационные индексы рассчитываются исходя из данных наиболее стабильных участков спектра: красной и ближней инфракрасной областей. В первой области (0,62 – 0,75 мкм) происходит максимум поглощения солнечной радиации зеленым пигментом растений, а во второй

(0,75–1,3 мкм) — максимальное отражение энергии [23,37].

Оценить состояние растительного покрова, а также выявить площадки, покрытые и непокрытые растениями, возможно при помощи индексов группы Broadband Greenness. Определение территорий, свободных от растений, способствует своевременному их досаживанию, что сохранит эффективность очистки на прежнем уровне. Наиболее популярным индексом из данной группы является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который позволяет количественно оценить биомассу растений. Данный индекс принимает положительные значения для растительности, и чем оно больше, тем больше значение биомассы [21, 23, 37–39].

В связи с тем, что *Phragmites australis* и *Elodea Canadensis* будут использоваться для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений, следует отслеживать эффективность поглощения данных загрязняющих веществ. Азот является составной частью органических соединений растений, поэтому быстрый прирост фитомассы свидетельствует о его высокой концентрации. Определение концентрации азота в растительном покрове проводится при помощи индекса NDNI (Normalized Difference Nitrogen Index) группы Canopy Nitrogen [21, 40].

Заключение

Деятельность горнопромышленных предприятий сопровождается экологическими проблемами. При отсутствии или недостаточной эффективности системы очистки загрязняющие вещества могут попадать в окружающую среду, вызывая необратимые последствия в экологической ситуации на территории предприятия и близлежащих земель. Поэтому на предприятиях необходимо осуществлять природоох-

ранные мероприятия для локализации негативного воздействия.

Одна из проблем открытой разработки месторождений буровзрывным способом является попадание азотных соединений в карьерные сточные воды. Решением этой проблемы является применение биологического метода очистки воды с использованием растений-макрофитов: *Phragmites australis* и *Elodea Canadensis*. Данные растения используют соединения азота в процессе жизнедеятельности, тем самым уменьшая их концентрацию в сточных водах, поступивших на очистку. В связи с тем, что растительность может быстро развиваться, необходимо производить ее наблюдение.

В ходе теоретических исследований сквозных цифровых технологий было выявлено, что применение спектральной съемки на базе малогабаритного беспилотного летательного аппарата вертолетного типа позволяет осуществлять оперативный мониторинг растений-макрофитов и получать данные, используемые для вычисления вегетационных индексов. По данным индексам можно оценить состояние растительности, охарактеризовать ее свойства. Использование индексов группы Broadband Greenness и Canopy Nitrogen позволяет оперативно принимать меры по стабилизации ситуации при ухудшении состояния используемых растений-макрофитов.

Исследования применимости спектральной съемки для проведения экологического мониторинга водной растительности показывают ее эффективность при исследовании функционирования constructed wetlands. Получение данных о количественном изменении азота в растениях способствует определению способности очищения сконструированных водноболотных угодий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панфилов Е. И. Оценка воздействий на недра и возможных последствий при разработке // Горная промышленность. — 2009. — Т. 2. — № 78. С. 26 — 32.
2. Chukaeva M. A., Matveeva V. A. The present-day hydrochemical state of hydroecosystems suffering the technogenic effect of AO Apatit // Water Resources. 2018. Vol. 45. No. 6. Pp. 935 — 940. DOI: 10.1134/s0097807818060040.
3. Nevskaya M. A., Fedoseev S. V., Marinina O. A. The analysis of the problems of mining waste products in the mineral resources sector of the Russian Federation // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 16. Pp. 9018 — 9025.
4. Мельников Н. Н. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 10. С. 7 — 10. DOI: 25018/0236—1493—2017—10—23—7-1818.
5. Сибирская нефть : электрон. журн. 2017. № 147. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/> (дата обращения: 20.12.2020).
6. Разманова С. В., Андрухова О. В. Нефтесервисные компании в рамках цифровизации экономики: оценка перспектив инновационного развития // Записки Горного института. — 2020. — Т. 244. — С. 482 — 492. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.11.
7. Malyshkov G. B., Sinkov L. S., Nikolaichuk L. A. Analysis of economic evaluation methods of environmental damage at calculation of production efficiency in mining industry // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. No. 10. Pp. 2551 — 2554.
8. Forsyth B., Cameron A., Miller S. Explosives and water quality / Proceedings of Sudbury'95 Mining and the Environment. 28 May-1 June 1995. — Montreal, Quebec, Canada, MEND, 1995. Pp 795 — 803.
9. Petrov D. S. Kuznecov V. S., Suprun I. K., Zhuravkova, M. A., Solnyshkova M. A. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. Article 055044.
10. Алейников Н. Н., Вершинин Н. Н., Шведов К. К. Проблемы мониторинга экологической безопасности окружающей среды в местах проведения взрывных работ // Записки Горного института. — 2001. — Т. 148. — № 2. — С. 3 — 5.
11. ia H., Yuan Q. Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgae-bacteria consortia // Cogent environmental science. 2016. Vol. 2, No. 1. Article 1275089. DOI: 10.1080/23311843.2016.1275089.
12. Гавриленко А. В., Степачёва А. А., Молчанов В. П., Сульман М. Г. Комплексная очистка сточных вод от нитратов // Бюллетень науки и практики. — 2016. — Т. 10. — С. 42 — 46.
13. Ахмадиев А. К., Экзарьян В. Н. Реабилитация природной среды — структурный элемент экологической безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 112 — 120. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—2-0—112—120.
14. Rajan R. J., Sudarsan J. S., Nithiyantham S. Microbial population dynamics in constructed wetlands: Review of recent advancements for wastewater treatment // Environmental Engineering Research. 2019. No. 24 (2). Pp. 181 — 190. DOI: 10.4491/EER.2018.127.
15. Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова М. В., Фокина Н. В., Редькина В. В., Евдокимова Г. А. Пути повышения эффективности доочистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в условиях кольского севера // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2018. — № 15. — С. 456 — 459. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.116>.

16. *Сивкова Е. Е., Семёнов С. Ю.* Использование технологии «constructed wetlands» для очистки сточных вод малых населенных пунктов и предприятий // Известные Томского государственного университета. Биология. — 2013. — Т. 4. — № 12. — С. 123 — 130.

17. *Jenssen P. D., Maehlum T., Krogstad T.* Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments // Water Science and Technology. 1993. Vol. 28. No. 10. Pp. 149—157. DOI: 10.2166/wst.1993.0223.

18. *Varma M. Gupta A., Ghosal P., Majumder A.* A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature // Science Total Environmental. — 2021. — Vol. 755. Article 142540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142540.

19. *Ji B., Zhao Y., Vymazal J., Qiao S. Wei T., Li J., Mander Ü.* Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A review of the current knowledge // Ecological Engineering. 2020. Vol. 157. Article. 105992. DOI: 10.1080/23311843.2016.1275089.

20. *Vymazal J.* Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review // Ecological Engineering. 2013. Vol. 61. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.023.

21. *Черепанов А. С., Дружинина Е. Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. — 2009. — № 3. С. 28 — 32.

22. *Серёда И. И., Тутубалина О. В.* Использование вегетационных индексов для оценки состояния посевов кукурузы на основе воздушных гиперспектральных снимков // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики факультета МГУ имени М. В. Ломоносова: сб. науч. ст. — М.: Издательский дом КДУ, 2017. — С. 61 — 69.

23. *Адамович Т. А. Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я., Савиных В. П.* Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. — 2018. — № 1. С. 18 — 24.

24. *Ferwerda J. G., Skidmore A. K., Mutanga O.* Nitrogen detection with hyperspectral normalized ratio indices across multiple plant species // International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26. No. 18. Pp. 4083 — 4095. DOI: 10.1080/01431160500181044.

25. *Якушев В. П., Блохина С. Ю.* Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в интересах сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. — № 5. С. 253 — 256. DOI: 10.21046/2070—7401—2018—15—5-257—262.

26. *Альт В. В., Гурова Т. А., Елкин О. В., Клименко Д. Н., Максимов Л. В., Пестунов И. А., Дубровская О. А., Генаев М. А., Эрст Т. В., Генаев К. А., Комышев Е. Г., Хлесткин В. К., Афонников Д. А.* Использование гиперспектральной камеры Specim IQ для анализа растений // Вавиловский журнал генетики и селекции. — 2020. — Т. 24. — № 3. — С. 259 — 266. DOI: 10.18699/VJ19.587.

27. *Adão T. Hruška J., Pádua L., Bessa J., Peres E., Morais R., Sousa J.* Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. No. 11. Article 1110. DOI: 10.3390/rs9111110.

28. *Islam M. R., Garcia S. C., Henry D.* Use of normalised difference vegetation index, nitrogen concentration, and total nitrogen content of whole maize plant and plant fractions to estimate yield and nutritive value of hybrid forage maize // Crop and Pasture Science. 2011. Vol. 62. Pp. 374 — 382. DOI: 10.1071/CP10244.

29. *Kostrzewski M., Waller P., Guertin P., Haberland J., Colaizzi P., Barnes E., Thompson T., Clarke T., Riley E., Choi C.* Ground-Baswd Remote Sensing of Water and Nitrogen Stress // Transactions of the American Society of Agriculture Engineering. 2002. Vol. 4. Pp. 29 — 38.

30. *Ивановская В. В., Голубева Е. И.* Применение данных дистанционного зондирования для решения задач сельского хозяйства // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты устойчивого развития: сб. науч. ст. — Минск: Белорусский государственный университет, 2019. — С. 96 — 99.

31. *Ивановская В. В., Голубева Е. И.* Картографирование земельных ресурсов на основе данных дистанционного зондирования // Геоинформационные технологии и космический мониторинг. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 74—79. DOI: 10.23885/2500—123x-2019—2-4—74—79.

32. *Данилов А. С.* Разработка дистанционных методов оценки и прогноза состояния атмосферного воздуха на территориях горнопромышленных агломераций : Дисс. ... канд. техн. наук. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. — 187 с.

33. *Пашкевич М. А., Смирнов Ю. Д., Данилов А. С.* Оценка качества окружающей среды с применением малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Записки Горного института. — 2013. — Т. 204. — С. 269 — 271.

34. *Кремчев Э. А., Данилов А. С., Смирнов Ю. Д.* Состояние мерологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов // Записки Горного института. — 2019. — Т. 235. — С. 96 — 105. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.96.


35. *Волков В. Г., Гиндин П. Д., Карпов В. В., Кузнецов С. А., Митрофанов Ю. С., Сенник Б. Н.* Приборы визуализации изображения для обеспечения энергосбережения и экологического мониторинга // Контенант. — 2019. — Т. 18. — № 4. — С. 620 — 628.

36. *Alekseenko, Vladimir A., Shvydkaya, Natalya V., Alekseenko, Alexey V., et al.* Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress. // *Plants*. 2021. Vol. 10. No. 1. Article 33. DOI: 10.3390/plants10010033.

37. *Черепанов А. С.* Вегетационные Индексы // Геоматика. — 2011. — № 2. — С. 98 — 102.

38. *Strizhenok A. V., Ivanov A. V.* Ecological assessment of the current state of environmental components on the territory of the impact of cement production industry // *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. No. 6. Pp. 160—165. DOI: 10.12911/22998993/76850.

39. *Осинов А. Г., Дмитриев В. В., Ковязин В. Ф.* Методика анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона по материалам дистанционного зондирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331, — № 10. — С. 49 — 57. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2849.

40. *Wang L., Wei Y.* Revised normalized difference nitrogen index (NDNI) for estimating canopy nitrogen concentration in wetlands // *Optik*. 2016. Vol. 127. No. 19. Pp. 7676 — 7688. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.05.115. 

REFERENCES

1. Panfilov E. I. Assessment of impacts on subsoil and consequences in the development of mineral deposits. *Gornaja promyshlennost'*. 2009, Vol. 2, no. 78, pp. 26—32. [In Russ].

2. Chukaeva M. A., Matveeva V. A. The present-day hydrochemical state of hydroecosystems suffering the technogenic effect of AO apatit. *Water Resources*. 2018. Vol. 45. no. 6. Pp. 935 940. DOI: 10.1134/s0097807818060040.

3. Nevskaya M. A., Fedoseev S. V., Marinina O. A. The analysis of the problems of mining waste products in the mineral resources sector of the Russian Federation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. no. 16. pp. 9018—9025.

4. Mel'nikov N. N. Information technologies in ecological strategy of mining development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 10, pp. 7—10. DOI: 25018/0236—1493—2017—10—23—7-18.

5. *Sibirskaja neft'* [Siberian oil] : jelektron. zhurn. 2017, no. 147, available at: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/> (accessed 20.12.2020). [In Russ].

6. Razmanova S. V., Andruhova O. V. Oilfield service companies as part of economy digitalization: assessment of the prospects for innovative development. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020, Vol. 244, pp. 482 – 492. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.11. [In Russ].

7. Malyshkov G. B., Sinkov L. S., Nikolaichuk L. A. Analysis of economic evaluation methods of environmental damage at calculation of production efficiency in mining industry. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. no. 10. pp. 2551 – 2554.

8. Forsyth B., Cameron A., Miller S. Explosives and water quality. *Proceedings of Sudbury'95 Mining and the Environment. 28 May-1 June 1995*. Montreal, Quebec, Canada, MEND, 1995. pp. 795 – 803.

9. Petrov D. S., Kuznecov V. S., Suprun I. K., Zhuravkova, M. A., Solnyshkova M. A. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. Article 055044.

10. Aleinikov N. N., Vershinin N. N., Shvedov K. K. Проблемы мониторинга экологической безопасности окружающей среды в местах проведения взрывных работ. *Zapiski Gornogo instituta*. 2001, Vol. 148, no. 2. pp. 3–5. [In Russ].

11. Jia H., Yuan Q. Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgae-bacteria consortia. *Cogent environmental science*. 2016. Vol. 2, no. 1. Article 1275089. DOI: 10.1080/23311843.2016.1275089.

12. Gavrilenko A. V., Stepachjova A. A., Molchanov V. P., Sul'man M. G. Complex denitrification of waste water. *Bjulleten' nauki i praktiki*. 2016, Vol. 10, pp. 42 – 46. [In Russ].

13. Ahmadiev A. K., Jekzar'jan V. N. Rehabilitation of the natural environment as the structural element of ecological security. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bul.* 2020, no. 2, pp. 112 – 120. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2020 – 2-0 – 112 – 120. [In Russ].

14. Rajan R. J., Sudarsan J. S., Nithiyantham S. Microbial population dynamics in constructed wetlands: Review of recent advancements for wastewater treatment. *Environmental Engineering Research*. 2019. no. 24 (2). pp. 181 – 190. DOI: 10.4491/EER.2018.127.

15. Ivanova L. A., Mjazin V. A., Kornejkova M. V., Fokina N. V., Red'kina V. V., Evdokimova G. A. Ways of increasing the efficiency of purpose wastewater treatment from mineral nitrogen compounds in the kola north conditions. *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN*. 2018, no. 15, pp. 456 – 459. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.116>. [In Russ].

16. Sivkova E. E., Semjonov S. Ju. Using «constructed wetlands» technology for wastewater treatment in small communities and enterprises. *Izvestnie Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologija*. 2013, Vol. 4, no. 12, pp. 123 – 130. [In Russ].

17. Jenssen P. D., Maehlum T., Krogstad T. Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments. *Water Science and Technology*. 1993. Vol. 28. no. 10. pp. 149 – 157. DOI: 10.2166/wst.1993.0223.

18. Varma M. Gupta A., Ghosal P., Majumder A. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science Total Environmental*. 2021. Vol. 755. Article 142540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142540.

19. Ji B., Zhao Y., Vymazal J., Qiao S. Wei T., Li J., Mander Ü. Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A review of the current knowledge. *Ecological Engineering*. 2020. Vol. 157. Article. 105992. DOI: 10.1080/23311843.2016.1275089.

20. Vymazal J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 61. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.023.

21. Cherepanov A. S., Druzhinina E. G. Spectral properties of vegetation and vegetation indexes. *Geomatika*. 2009, no. 3, pp. 28–32. [In Russ].

22. Sereda I. I., Tutubalina O. V. *Ispol'zovanie vegetacionnyh indeksov dlja ocenki sostojanija posevov kukuruzy na osnove vozdušnyh giperspektral'nyh snimkov* [Use of vegetation indices for assessing the state of maize crops on the basis of aerial hyperspectral imagery], *Nauchnye issledovanija molodyh uchenyh-kartografov, vypolnennye pod rukovodstvom sotrudnikov kafedry kartografii i geoinformatiki fakul'teta MGU imeni M. V. Lomonosova: sb. nauch. st.* Moscow, Dom KDU Publ., 2017, pp. 61–69. [In Russ].

23. Adamovich T. A., Kantor G. Ja., Ashihmina T. Ja., Savinyh V. P. The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve «Nurgush». *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*. 2018, no. 1, pp. 18–24. [In Russ].

24. Ferwerda J. G., Skidmore A. K., Mutanga O. Nitrogen detection with hyperspectral normalized ratio indices across multiple plant species. *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. no. 18. pp. 4083–4095. DOI: 10.1080/01431160500181044.

25. Jakushev V. P., Blohina S. Ju. Current problems and prospects for the use of remote sensing of the Earth in agriculture. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2018, Vol. 15, no. 5, pp. 253–256. DOI: 10.21046/2070–7401–2018–15–5-257–262. [In Russ].

26. Al't V. V., Gurova T. A., Elkin O. V., Klimenko D. N., Maksimov L. V., Pestunov I. A., Dubrovskaja O. A., Genaev M. A., Jerst T. V., Genaev K. A., Komyshev E. G., Hlestkin V. K., Afonnikov D. A. the use of specim iQ, a hyperspectral camera, for plant analysis. *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii*. 2020, Vol. 24, no. 3, pp. 259–266. DOI: 10.18699/VJ19.587. [In Russ].

27. Adão T. Hruška J., Pádua L., Bessa J., Peres E., Morais R., Sousa J. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. no. 11. Article 1110. DOI: 10.3390/rs9111110.

28. Islam M. R., Garcia S. C., Henry D. Use of normalised difference vegetation index, nitrogen concentration, and total nitrogen content of whole maize plant and plant fractions to estimate yield and nutritive value of hybrid forage maize. *Crop and Pasture Science*. 2011. Vol. 62. pp. 374–382. DOI: 10.1071/CP10244.

29. Kostrzewski M., Waller P., Guertin P., Haberland J., Colaizzi P., Barnes E., Thompson T., Clarke T., Riley E., Choi C. Ground-Baswd Remote Sensing of Water and Nitrogen Stress. *Transactions of the American Society of Agriculture Engineering*. 2002. Vol. 4. pp. 29–38.

30. Ivanovskaja V. V., Golubeva E. I. *Primenenie dannyh distancionnogo zondirovanija dlja reshenija zadach sel'skogo hozjajstva* [Application of distance sensing data for solving agricultural problems]. *Sovremennye napravlenija razvitija fizicheskoj geografii: nauchnye i obrazovatel'nye aspekty ustojchivogo razvitija: sb. nauch. st.* Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj universitet Publ., 2019, pp. 96–99. [In Russ].

31. Ivanovskaja V. V., Golubeva E. I. Mapping land resources based on remote sensing data. *Geoinformacionnye tehnologii i kosmicheskij monitoring*. 2019, Vol. 2, no. 4, pp. 74–79. DOI: 10.23885/2500–123x-2019–2-4–74–79. [In Russ].

32. Danilov A. S. *Razrabotka distancionnyh metodov ocenki i prognoza sostojanija atmosfernogo vozduha na territorijah gornopromyshlennyh aglomeracij* [Development of remote sensing methods and forecasting the state of atmospheric air in the territories of mining agglomerations], PhD's thesis, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg mining university, 2019, 187 p. [In Russ].

33. Pashkevich M. A., Smirnov Ju. D., Danilov A. S. Estimation of quality of environment with the use of small pilotless aircrafts. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013, Vol. 204, pp. 269–271. [In Russ].

34. Kremcheev Je. A., Danilov A. S., Smirnov Ju. D. Metrological support of monitoring systems based on unmanned aerial vehicles. *Zapiski Gornogo instituta*. 2019, Vol. 235, pp. 96–105. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.96. [In Russ].
35. Volkov V. G., Gindin P. D., Karpov V. V., Kuznecov S. A., Mitrofanov Ju. S., Sennik B. N. Imaging devices for energy saving and environmental control. *Kontenant*. 2019, Vol. 18, no. 4, pp. 620–628. [In Russ].
36. Alekseenko, Vladimir A., Shvydkaya, Natalya V., Alekseenko, Alexey V., et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress. *Plants*. 2021. Vol. 10. no. 1. Article 33. DOI: 10.3390/plants10010033.
37. Cherepanov A. S. Vegetation indexes. *Geomatika*. 2011, no. 2, pp. 98–102. [In Russ].
38. Strizhenok A. V., Ivanov A. V. Ecological assessment of the current state of environmental components on the territory of the impact of cement production industry. *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. no. 6. pp. 160–165. DOI: 10.12911/22998993/76850.
39. Osipov A. G., Dmitriev V. V., Kovyazin V. F. Methods of analyzing landscape ecosystem diversity of a region based on remote sensing. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2020, Vol. 331, no. 10. pp. 49–57. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2849. [In Russ].
40. Wang L., Wei Y. Revised normalized difference nitrogen index (NDNI) for estimating canopy nitrogen concentration in wetlands. *Optik*. 2016. Vol. 127. no. 19. pp. 7676–7688. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.05.115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коротаяева Анна Эдуардовна¹ – аспирант, s205056@stud.spmi.ru;

Пашкевич Мария Анатольевна¹ – докт. техн. наук, профессор, mpash@spmi.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korotaeva A. E.¹, postgraduate student, s205056@stud.spmi.ru;

Pashkevich M. A., Dr. Sci. (Eng.), Professor;

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 29.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 29.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

