

ОСОБЕННОСТИ ЗАРАСТАНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА



¹Н.Г. Максимович, ¹А.Д. Деменев, ¹О.А. Березина, ¹Р.К. Абдуллин

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет

Представлены результаты исследования зарастания породных отвалов угольных шахт Кизеловского угольного бассейна, расположенных на территории Пермского края, по данным дистанционного зондирования Земли и расчётов вегетационного индекса NDVI. Установлено, что происходят естественные процессы зарастания нарушенных земель. Отмечен рост средних значений вегетационного индекса для исследуемой выборки отвалов в период 1986–2021 гг., что в первую очередь связано с прекращением эксплуатации шахт в этом районе.

Ключевые слова: породные отвалы, Кизеловский угольный бассейн, зарастание, кислые стоки, дистанционное зондирование Земли, вегетационный индекс NDVI, многолетний ряд спутниковых снимков, Landsat

Статья поступила в редакцию 12.11.2021, доработана 30.05.2022, принята к публикации 18.10.2022

Peculiarities of Colonization of Rock Waste Disposal Area with Vegetation at the Kizelovsky Coal Deposit

¹N.G. Maximovich, ¹A.D. Demenev, ¹O.A. Berezina, ¹R.K. Abdullin

¹Perm State National Research University, 614068 Perm, Russia

The paper presents the study results of the rock waste disposal area colonization with vegetation at the Kizelovsky coal deposit according to remote sensing data of the Earth and calculations of the vegetation index NDVI for the Perm Territory. It was determined that natural colonization of disturbed lands were taking place. An increase in the average values of vegetation for the studied dumps in the period 1986–2021 was revealed which is primarily due to the cessation of mining in the territory under consideration.

Keywords: waste-disposal dump, Kizelovsky coal deposit, colonization with vegetation, acid wastewater, Earth's remote sensing, vegetation index NDVI, long-term records of satellite images, Landsat

Received 12.11.2021, revised 30.05.2022, accepted for publication 18.10.2022

DOI: 10.18412/1816-0395-2023-2-67-71

Разработка угольных месторождений шахтным способом приводит к негативным последствиям для окружающей среды, таким как накопление отходов добычи угля в виде породных отвалов и формирование стоков с них, выведение значительных территорий из хозяйственного использования. На территории Пермского края, по данным Росреестра, площадь нарушенных земель, представленных карьерами, выемками, отвалами, хранилищами горнодобывающих и перерабатывающих предприятий и другого, состав-

ляет 936,6 км² [1]. Значительная часть отвалов находится на территории Кизеловского угольного бассейна (КУБ), расположенного на востоке края (рис. 1).

С 1796 г. до начала 2000-х гг. здесь велась разработка угленосной толщи шахтным способом. В результате на поверхность было извлечено более 35 млн м³ пород, представляющих собой механическую смесь песчаников, аргиллитов, алевролитов, углистых сланцев, известняков и каменного угля. Угленосная толща КУБа характеризуется высоким содержанием микроэлементов и

серы (до 10 %) в форме пирита. Породные отвалы размещались стихийно, в большинстве случаев вблизи от шахт. Их учет, особенно на начальном этапе эксплуатации бассейна, не производился, поэтому оценка общего количества отвалов и их площади до сих пор является актуальной задачей [2, 3].

По ландшафтно-климатическому районированию территории КУБа относится к бореальной таежной зоне, подзоне низкогорных среднетаежных ландшафтов. Таежные и горно-таежные ландшафты характеризуются

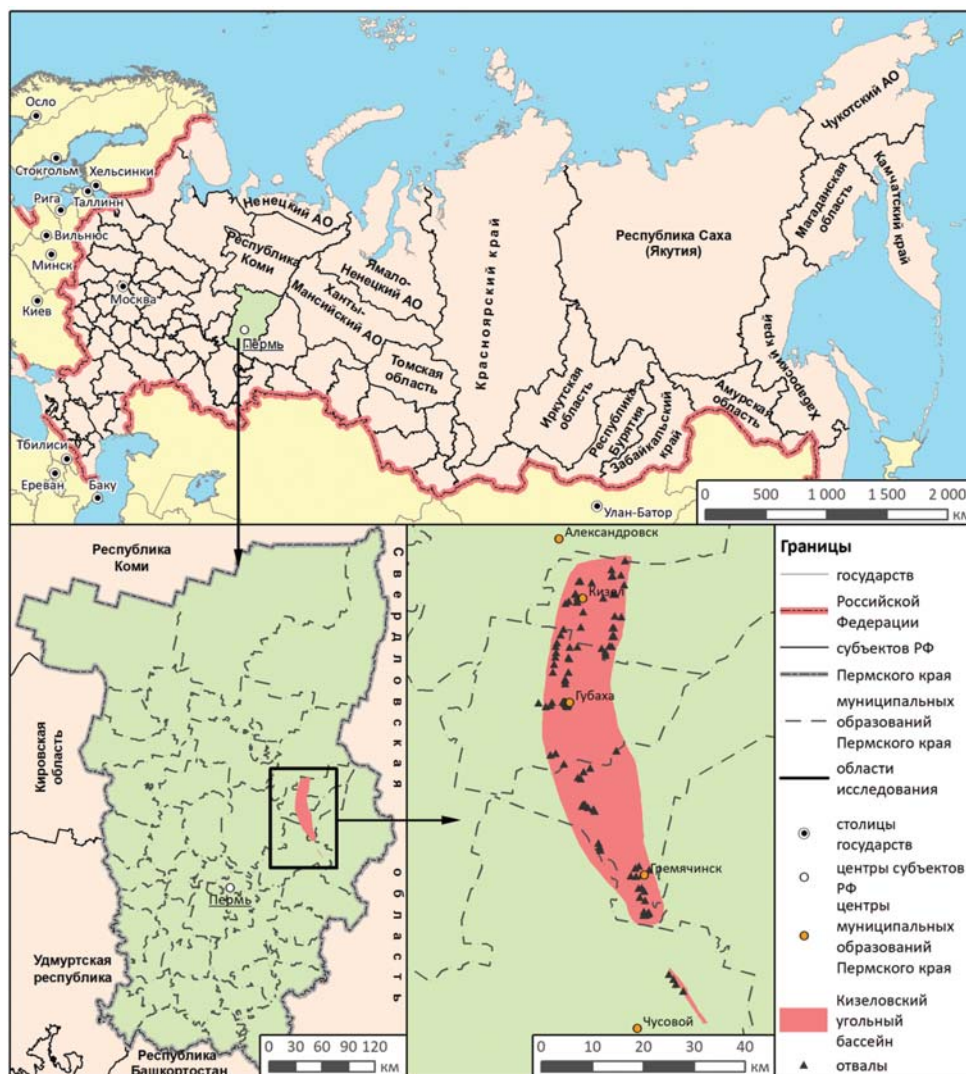


Рис. 1. Местоположение КУБ и породных отвалов на его территории
 Fig. 1. Location of the CBM and waste-disposal dumps on its territory

пермацидным (промывным) режимом, где атмосферные осадки преобладают над испарением, а ведущим почвообразовательным процессом является подзолистый. Промывной режим способствует преобладанию выноса химических элементов над процессом накопления [3].

Выпадающие на поверхность породных отвалов атмосферные осадки вызывают эрозионные процессы, фильтруясь через тело отвала. При их контакте в присутствии кислорода с угольными

и породными частицами с высоким содержанием сульфидной серы происходит окисление пирита. В кислой среде также происходит экстракция микроэлементов и насыщение ими стоков с отвалов. Попадая в естественные водотоки, стоки с отвалов вызывают их закисление и повышение концентрации ряда химических элементов (Fe, Al, Mn, Be и тяжелых металлов). Далее, по мере снижения кислотности среды в естественных водотоках, образуются гидроксиды Fe, Al,

Mn и происходит их осаждение и активное накопление в донных отложениях.

К настоящему времени породные отвалы частично покрылись как травянистой, так и древесной растительностью, что может быть выявлено по спутниковым снимкам при расчёте вегетационного индекса за многолетний период. Эффективность использования дистанционных методов при изучении значительных, в том числе не всегда доступных территорий Кизеловского бассейна показана в работе [3]. Развитие растительного покрова стимулирует жизнедеятельность аэробных гетеротрофных микроорганизмов в верхней части грунта отвалов, которые получают фильтрующиеся через грунт с атмосферными осадками органические вещества от разлагающегося опада и корневых выделений растений, что, в свою очередь, должно приводить к нейтрализации кислых стоков [4].

Таким образом, цель исследования заключается в выявлении зарастания отвалов угольных шахт КУБ с помощью данных дистанционного зондирования Земли за многолетний период.

Объект исследования

Отвалы горных пород занимают значительные площади на территории КУБа. Часть из них являются объектами регулярного мониторинга, влияние других никак не оценивалось за двухсотлетнюю историю разработки месторождения. Стоки с отвалов наносят существенный ущерб окружающей среде. По данным мониторинга за 32 отвалами, стоки с них характеризуются непостоянным химическим составом суммарным объемом до 32 м³/ч (табл. 1).

Показатель pH изменяется в пределах 2,3–3,7, наблюдаются значительные превышения по

Таблица 1. Химический состав стоков породных отвалов за многолетний период 2005–2020 г.

Table 1. The chemical composition of run-off from waste-disposal dumps over the period 2005–2020

Тип отвала	pH	Содержание элементов, мг/дм ³								
		Сухой остаток	SO ₄	Feобщ	Al	Be	Co	Li	Ni	Mn
Конусный	2,3/2,6	19040/14,2	11656/9496	860,5/683	1060/526	0,068/0,033	1,259/0,93	14,72/3,038	2,446/1,896	32,12/6,927
Плоский	3,4/2,9	7806/10486	4692/6842	18,0/280,5	315/704	0,054/0,099	0,773/1,537	17,82/8,06	1,68/3,068	19,95/20,04

Примечание. Максимальные (числитель) и минимальные (знаменатель) значения за многолетний период с 2005 по 2020 гг.

содержанию Fe, Al, Mn и ряду микроэлементов, таких как Hg, Be и др. Вклад стоков с отвалов составляет около 7,5–10 % общего количества загрязняющих веществ, поступающих в естественные водотоки на исследуемой территории [2, 3]. С 2007 по 2020 гг. отмечается увеличение водородного показателя стоков отвалов, а также снижение содержания основных загрязняющих компонентов: железа, алюминия, сульфатов (рис. 2). В результате анализа спутниковых данных было отмечено зарастание отвалов.

Материалы и методы

Для уточнения общего количества породных отвалов на территории КУБа было проведено их дешифрирование по снимкам сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса ArcGIS Imagery, также они были классифицированы на конусные и плоские. На ряде участков по снимкам выявлена деградация растительного покрова в поймах временных и постоянных водотоков, вызванная стоками с отвалов (рис. 3). На топографической основе масштаба 1:25000 были построены линии стока, определены для каждого отвала водоприемник кислых шахтных вод и расстояние до него. Направление определялось по цифровой модели рельефа при помощи инструмента "направление стока" в программном продукте ArcGIS 10.x.

Для оценки многолетней динамики процесса зарастания и влияния на нее работ по рекультивации отвалов были использованы снимки со спутников серии Landsat, полученные с открытого ресурса Earth Explorer (Геологическая служба США) за период с 1986 по 2021 гг. (табл. 2).

По снимкам были проанализированы многолетние тренды нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для крупных отвалов [5]. Это показатель фотосинтетически активной биомассы, используемый для количественной оценки растительного покрова, в том числе зарастания породных отвалов [6–8], который рассчитывается по формуле:

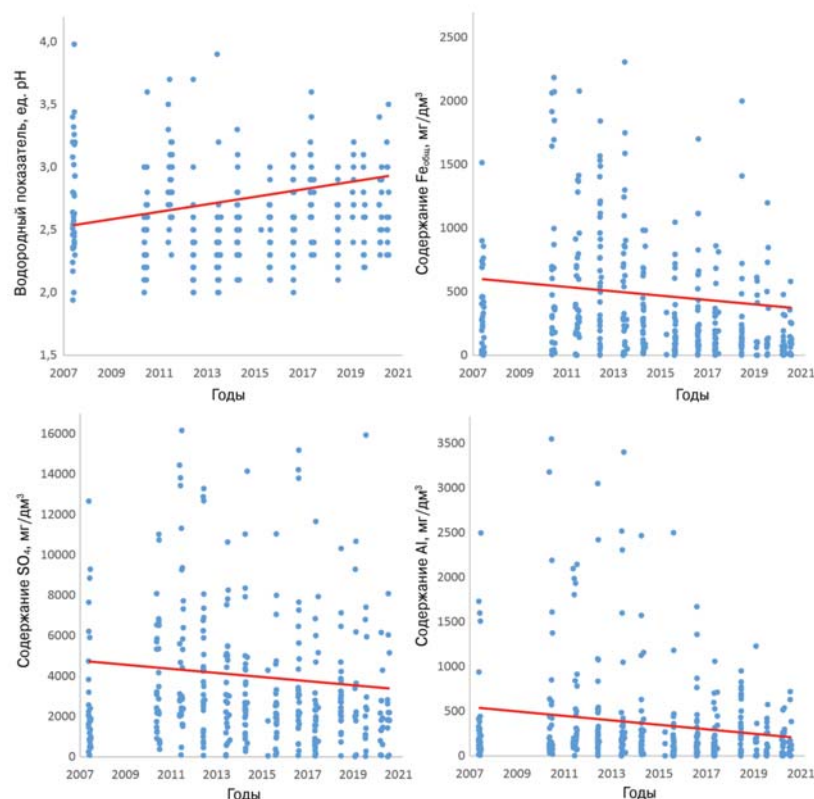


Рис. 2. Значение водородного показателя и содержания различных компонентов в стоках породных отвалов за многолетний период: а – pH; б – Fe_{общ}; в – SO₄; г – Al

Fig. 2. The value of the hydrogen index and the content of various components in the drains of rock dumps for a multi-year period

a – pH; b – Fe_{общ}; c – SO₄; d – Al

Таблица 2. Перечень снимков, используемых для анализа и расчета NDVI (пространственное разрешение используемых спектральных каналов, 30 м)
Table 2. List of images used for analysis and calculation of NDVI values (Spatial resolution of the used spectral channels, 30 m)

Дата, время съемки (UTC)	Спутник, сенсор	Строка/столбец в системе разграфки WRS2
07.06.1986, 06:44:16	Landsat-5, TM	167/19
19.06.1987, 06:38:44	Landsat-5, TM	166/19
22.07.1988, 06:49:32	Landsat-4, TM	167/19
20.07.1990, 06:40:20	Landsat-5, TM	167/19
30.06.1991, 06:37:13	Landsat-5, TM	166/19
16.06.1992, 06:37:26	Landsat-5, TM	166/19
19.06.1993, 06:36:35	Landsat-5, TM	166/19
27.07.1995, 06:18:23	Landsat-5, TM	166/19
05.06.1997, 06:49:22	Landsat-5, TM	167/19
27.06.1999, 06:58:07	Landsat-5, TM	167/19
23.07.2000, 07:11:34	Landsat-7, ETM	167/19
03.07.2001, 07:03:27	Landsat-7, ETM	166/19
06.07.2002, 07:02:31	Landsat-7, ETM	166/19
16.07.2006, 07:13:20	Landsat-5, TM	167/19
30.05.2009, 07:02:07	Landsat-5, TM	166/19
25.06.2010, 07:10:51	Landsat-5, TM	167/19
21.06.2011, 07:03:23	Landsat-5, TM	166/19
01.07.2012, 07:08:40	Landsat-7, ETM	166/19
01.06.2013, 07:22:19	Landsat-8, OLI	167/19
04.06.2014, 07:19:54	Landsat-8, OLI	167/19
23.06.2015, 07:19:35	Landsat-8, OLI	167/19
04.07.2016, 07:13:58	Landsat-8, OLI	166/19
09.07.2021, 07:20:11	Landsat-8, OLI	167/19



Рис. 3. Плоский (1), конусный (2) породные отвалы и пойма р. Вящер (3) на снимке сверхвысокого пространственного разрешения с сервиса ArcGIS Imagery

Fig. 3. Flat (1), conical (2) waste-disposal dumps and flood bed of the river Vyasher (3) in an ultra-high spatial resolution image from ArcGIS Imagery

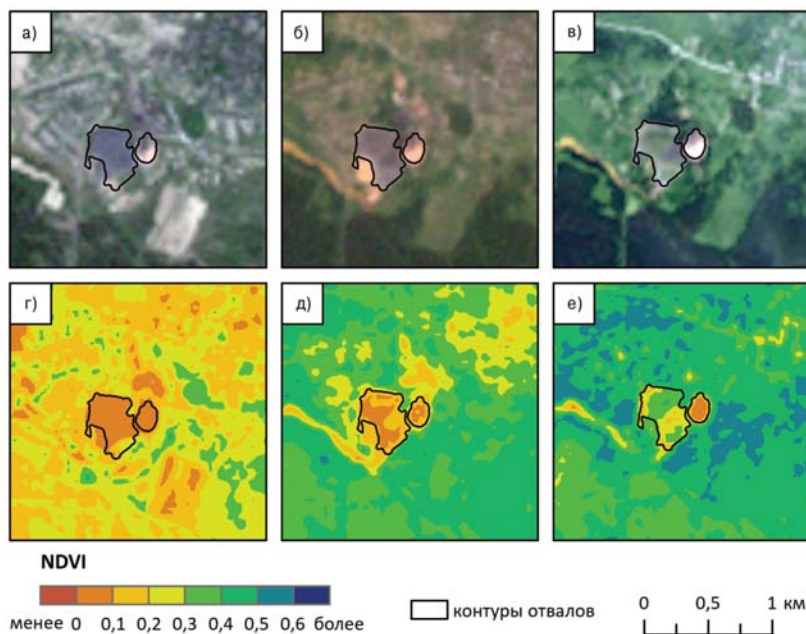


Рис. 4. Космические снимки Landsat в естественных цветах и значения NDVI за разные годы в районе отвала шахты Северная (а, г – 1986 г.; б, д – 2002 г.; в, е – 2016 г.)

Fig. 4. Landsat space images in natural colors and NDVI values for different years in the dump area of the Severnaya mine (a, d – 1986; b, e – 2002; c, f – 2016)

Таблица 3. Характеристики многолетней изменчивости NDVI за 1986–2021 гг. для участков породных отвалов

Table 3. Characteristics of the variability of NDVI values for the period 1986–2021 for waste-disposal dumps

Тип отвала	Наличие рекультивации	Количество отвалов (общее / со статистически значимым ростом NDVI)	Среднее значение NDVI для отвалов за годы		
			1986	2002	2021
Плоский	Да	12/8	0,07	0,14	0,20
		4/4	0,07	0,20	0,25
Конусный	Нет	4/3	0,05	0,14	0,22
		2/1	0,09	0,19	0,26

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR — отражение в ближнем инфракрасном канале снимка; RED — отражение в красном канале снимка.

В качестве пороговой площади было выбрано значение 4,5 га, что соответствует 50 пиксеям Landsat. Всего было выбрано 22 отвала, на которых проводятся регулярные наблюдения в рамках мониторинга. Чтобы исключить влияние сезонного фактора, анализировались снимки за период с 25 мая по 5 августа (всего 23 снимка за период с 1986 по 2021 гг.). Для расчета NDVI использовались снимки уровня обработки Level-2, для которых уже выполнена атмосферная коррекция с использованием алгоритмов LEDAPS и LaSRC [9, 10].

Результаты и обсуждения

На основе оценочной функции Тейла-Сена были рассчитаны линейные тренды значений NDVI для каждого отвала и оценена их значимость по непараметрическому тесту Манна-Кендалла. Отвалы были разделены на две группы: рекультивированные и нереккультивированные.

Всего на территории КУБа дешифрировано 110 породных отвалов, из них 16 конусные, 24 плоские и 70 не определены. Площадь нарушенных земель, занятых отвалами, составляет не менее 422 га. Минимальное расстояние до водотока — 0 м (несколько отвалов располагаются на берегах рек), максимальное — 2180 м, около 52 % всех стоков с отвалов поступают в бассейн р. Яйвы.

На большинстве отвалов по многолетнему ряду снимков Landsat наблюдается рост NDVI, связанный с их зарастанием. Так, среднее значение NDVI для исследуемых отвалов в 1986 г. составило 0,0667, а в 2021 г. увеличилось до 0,22, что свидетельствует о процессах восстановления растительного покрова. Отметим также, что значительный рост NDVI наблюдался несмотря на то, что лето 2021 г. отличалось малым количеством осадков на территории КУБа, что должно было способствовать снижению NDVI. Согласно тесту Манна-Кендалла, рост индекса стати-

стически значим для 16 из 22 отвалов при уровне значимости α , равном 0,05 (табл. 3). Интересно отметить, что в число отвалов, для которых не выявлено статистически значимое увеличение NDVI, входят как плоские, так и конусные. Слабое восстановление растительности на ряде отвалов можно связать с тем, что они эксплуатировались до 1998–2000 гг., и, соответственно, условия для восстановления растительности появились сравнительно недавно.

В целом, полученные данные свидетельствуют о естественных процессах зарастания нарушенных земель (рис. 4), так как статистически значимый рост NDVI был зафиксирован для отвалов, где рекультивационные работы еще не были выполнены. Рост средних значений NDVI для исследуемой выборки отвалов прослеживается в течение последних 20 лет, что связано с прекращением эксплуатации шахт в этом районе.

На основе экспериментальных данных установлено, что у растений в нормальном состоянии NDVI находится в интервале от 0,6 до 0,7, низкие значения индекса (в интервале 0,3–0,4) свидетельствуют об угнетенном состоянии или малой зеленой биомассе растительного покрова, что характерно для большинства отвалов на территории Кизеловского угольного бассейна [10]. Постепенное зарастание отвалов будет способствовать естественной нейтрализации стоков с отвалов вследствие активизации внутри отвалов микробиологических процессов, потребляющих органические соединения растительного происхождения.

Заключение

В породных отвалах угольных шахт с высоким содержанием сульфидов в районах с гумидным климатом на поверхности развиваются процессы почвообразования, которые способствуют в

дальнейшем созданию условий для их зарастания.

Для оценки интенсивности зарастания и эффективности рекультивации целесообразно применять результаты анализа космических снимков. Впервые для территории Кизеловского угольного бассейна проанализирован многолетний ряд космических снимков с 1986 по 2021 гг., дешифрированы все породные отвалы, определены расстояния до ближайшего водотока и рассчитан вегетационный индекс. На большинстве отвалов в пределах КУБа выявлен статистически значимый рост вегетационного индекса NDVI за последние два десятилетия, что указывает на восстановление растительности. Максимальное среднее значение индекса для всей выборки отвалов за многолетний период составило 0,26. Этот процесс имеет в основном естественный характер, существенного влияния рекультивации на динамику NDVI не выявлено.

Литература

1. Россия в цифрах. 2020: Крат.стат.сб. Под ред. Малкова П.В. М., Росстат, 2020. 550 с.
2. Красавин А.П., Сафин Р.Т. Экологическая реабилитация углепромышленных территорий Кизеловского бассейна в связи с закрытием шахт. Пермь, Звезда, 2005. 287 с.
3. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь, Раритет, 2018. 288 с.
4. Манак Ю.А., Стрельникова Т.О., Куприянов А.Н. Формирование растительного покрова в техногенных ландшафтах Кузбасса. Новосибирск, СО РАН, 2011. 168 с.
5. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351. Vol. 1. P. 309–317.
6. Shivesh K.K., Sukha R.S., Subodh K.M. Assessment of the capability of remote sensing and GIS techniques for monitoring reclamation success in coal mine degraded lands. Journal of Environmental Management. 2016. No. 182. P. 272–283.
7. Чашин А.Н., Кондратова М.А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна. Географический вестник. 2019. № 2(49). С. 135–147.
8. Комачкова И.В., Пуртова Л.Н. Состав гумуса почв, формирующихся на отвалах вскрышных пород Павловского угольного разреза при естественном зарастании. Вестник КрасГАУ. 2010. № 1. С.38–42.
9. Черепанов А.С. Вегетационные индексы. Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
10. Дубинин М. Вегетационные индексы. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. 2006. [Электронный ресурс]. URL: <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (дата обращения 23.10.2021).

References

1. Rossiya v tsifrakh. 2020: Krat.stat.sb. Pod red. Malkova P.V. M., Rosstat, 2020. 550 s.
2. Krasavin A.P., Safin R.T. Ekologicheskaya reabilitatsiya uglepromyshlennykh territorii Kizelovskogo basseina v svyazi s zakrytiem shakht. Perm', Zvezda, 2005. 287 s.
3. Maksimovich N.G., P'yankov S.V. Kizelovskii ugol'nyi bassein: ekologicheskie problemy i puti resheniya: monografiya. Perm', Raritet, 2018. 288 s.
4. Manakov Yu.A., Strel'nikova T.O., Kupriyanov A.N. Formirovanie rastitel'nogo pokrova v tekhnogennykh landshaftakh Kuzbassa. Novosibirsk, SO RAN, 2011. 168 s.
5. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351. Vol. 1. P. 309–317.
6. Shivesh K.K., Sukha R.S., Subodh K.M. Assessment of the capability of remote sensing and GIS techniques for monitoring reclamation success in coal mine degraded lands. Journal of Environmental Management. 2016. No. 182. P. 272–283.
7. Chashchin A.N., Kondratova M.A. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya otsenki tempov samozarostaniya ugol'nykh otvalov Kizelovskogo basseina. Geograficheskii vestnik. 2019. № 2(49). S. 135–147.
8. Komachkova I.V., Purtova L.N. Sostav gumusa pochv, formiruyushchikhsya na otvalakh vskryshnykh porod Pavlovskogo ugol'nogo razreza pri estestvennom zarastanii. Vestnik KrasGAU. 2010. № 1. S.38–42.
9. Cherepanov A.S. Vegetatsionnye indeksy. Geomatika. 2011. № 2. S. 98–102.
10. Dubinin M. Vegetatsionnye indeksy. Geograficheskie informatsionnye sistemy i distantsionnoe zondirovanie. 2006. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (data obrashcheniya 23.10.2021).

Н.Г. Максимович – канд. геол.-минерал. наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), e-mail: nmax@psu.ru • А.Д. Деменив – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ПГНИУ, e-mail: demenevartem@gmail.com • О.А. Березина – канд. географ. наук, доцент, ПГНИУ, e-mail: berezina.olga16@gmail.com • Р.К. Абдуллин – канд. техн. наук, доцент, ПГНИУ, e-mail: rinaha-26@mail.ru
N.G. Maximovich – Cand. Sci. (geol. And mineral.), Associate Professor, Perm State National Research University (PSNRU), e-mail: nmax@psu.ru • A.D. Demenev – Cand. Sci. (geol. And mineral.), Senior Research Fellow, PSNRU, e-mail: demenevartem@gmail.com • O.A. Berezina – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, PSNRU, e-mail: berezina.olga16@gmail.com • R.K. Abdullin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, PSNRU, e-mail: rinaha-26@mail.ru