

DOI 10.31509/2658-607x-202361-123
УДК 502.5:528.88

ДИНАМИКА ГИБЕЛИ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РАЙОНЕ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СЕВЕРНОГО МЕДНО- ЦИНКОВОГО РУДНИКА В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г.

А. Е. Квашнина^{1*}, Ф. К. Возьмитель¹, В. А. Хамедов^{2,3}

¹ Государственный природный заповедник «Денежкин Камень»
Россия, 624480, г. Североуральск, ул. Ленина, 6

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67

* E-mail: zapov.dk@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.03.2023

После рецензирования: 20.03.2023

Принята к печати: 22.03.2023

На основе данных дистанционного зондирования Земли выполнена реконструкция динамики площади погибшей лесной растительности на территории, оказавшейся под влиянием неконтролируемого подотвального стока с Северного медно-цинкового рудника на севере Свердловской области. По материалам дешифрирования серии спутниковых снимков за период с 2009 г. по 2022 г. выявлено экспоненциальное увеличение площади погибшей лесной растительности, рассчитана цифровая модель стока, подтверждена приуроченность очагов гибели растительности к формам рельефа местности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, дешифрирование космических снимков, гидрологический анализ, модель стока, гибель лесной растительности, рудник

На севере Свердловской области, на расстоянии 3 и 5 км от восточной границы заповедника «Денежкин Камень», на хребте Шемур расположены два карьера — Шемурский и Ново-Шемурский, разрабатываемые Акционерным обществом «Святогор» в составе Уральской горно-металлургической компании (УГМК). С 2008 г. добыча

медных, медно-цинковых серно-колчеданных руд на карьерах ведется открытым способом. Разработка карьеров производится на вершине хребта с крутыми склонами (высота хребта составляет 700 м над ур. м., а его уклоны от 21% до 40%), при этом находящиеся на склонах отвалы с содержанием колчеданов активно участву-

ют в формировании водотоков рек Банная, Чёрная, Ольховка и Тамшёр. Реки Банная и Чёрная являются притоками р. Тальтия, а реки Ольховка и Тамшёр — р. Шегультан. Реки Тальтия и Шегультан, в свою очередь, являются важными водотоками заповедника «Денежкин Камень», они берут начало на его территории. В 2018 г. выявлены случаи загрязнения всех указанных рек тяжёлыми металлами и обнаружены участки с погибшей лесной растительностью (Квашнина, Владимирова, 2019; Владимирова, Квашнина, 2019; Квашнина, 2022). Кроме действующих карьеров Шемурский и Ново-Шемурский в состав Северного медно-цинкового рудника входит карьер Тарьёрский, добыча на котором была остановлена в 2014 г.

Оценка влияния техногенного загрязнения на состав и свойства почвенных вод как фактора воздействия на состояние растительного покрова является одной из важнейших задач в решении экологической безопасности районов добычи и разработки полезных ископаемых (Ершов, 2020). В связи с этим целью данной работы является реконструкция динамики увеличения площадей погибшей лесной растительности на территории, оказавшейся под влиянием неконтролируемого подотвального стока на Северном медно-цинковом руднике с помощью дешифрирования серии спутниковых снимков за период с 2009 г. по 2022 г.

Спутниковые снимки среднего разрешения широко ис-

пользуются для исследования повреждений растительности в различных тематических задачах (Хамедов и др., 2006; Baumann et al., 2014). В настоящей работе использование данных дистанционного зондирования позволило реконструировать процессы гибели растительности вблизи охранной зоны заповедника, ранее не обнаруженные своевременно, а также обеспечило эффективность проведения натурных обследований за счет возможности одномоментного охвата большой по площади территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью выявления источников и путей попадания загрязняющих веществ в водотоки рек Банная, Чёрная, Тамшёр и Ольховка была создана цифровая модель рельефа (ЦМР) на основе топографических карт масштаба 1:25 000 и 1:50 000. Размер пикселя созданной ЦМР составил 10×10 м, что позволило сгладить локальные понижения и устранить небольшие ошибки и неточности модели. На основе ЦМР создан растр направления стока из каждой ячейки по ближайшей соседней ячейке вниз по склону наибольшей крутизны, а затем растр потока накопления в каждую ячейку для территории карьеров — суммарный сток. После привязки точек устьев к ячейкам с наибольшим суммарным стоком, на основе растра направления стока были созданы растровые карты водосборных областей и бассейнов рек.

Гидрологический анализ ЦМР и построение модели стока выполнены с помощью пакета инструментов ArcGIS Pro.

Для определения наличия и масштабов повреждений растительности в результате стоков загрязняющих веществ была проанализирована серия снимков Landsat-5, 7 и Sentinel-2 за летний сезон в период с 2006 г. по 2022 г. На снимках Landsat использовалась комбинация каналов коротковолновый инфракрасный 1 (SWIR1), ближний инфракрасный (NIR) и красный (Red). Для анализа снимков Landsat-5 использовалась комбинация каналов B5-B4-B3, для снимков Landsat-7 — B6-B5-B4. Для анализа снимков Sentinel-2 использована комбинация каналов коротковолновый инфракрасный 1 (SWIR1), ближний инфракрасный 8 (Vegetation Red Edge 8) и красный (Red), или B11-B8a-B4. Комбинации каналов красной части спектра, как правило, наилучшим образом детектируют повреждения растительности (Крылов и др., 2011; Никитина и др., 2019; Елсаков, 2021).

Для верификации процессов, зафиксированных по данным дистанционного зондирования, проводились натурные обследования участков погибшей лесной растительности в долинах рек Банная, Ольховка, Тамшёр, в том числе проводилась съемка с применением беспилотного летательного аппарата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты анализа построенной карты стока показывают, что с карьера Тарньёрский сток осуществляется в р. Мундыр (приток р. Ивдель) и в безымянный водоток, впадающий в р. Тальтия. С карьера Шемурский сток направлен в реку Банная (приток р. Тальтия) и в безымянный водоток, являющийся притоком р. Чёрная (впадает в р. Тальтия). С площадок склада слабоминерализованных пород и серно-колчеданных руд сток аккумулируется в р. Тамшёр (приток р. Шегультан). Стоки с карьера Ново-Шемурский участвуют в формировании рек Ольховка и Тамшёр, являющихся притоками р. Шегультан. На рис. 1 представлена подготовленная карта суммарного стока с территорий объектов Северного медно-цинкового рудника, подверженных загрязнению. Красным цветом на рисунке показаны водотоки с максимальным суммарным стоком, а зеленым — с минимальным. Рассчитанные водосборные области, участвующие в формировании водотоков на исследуемой территории, обозначены разными оттенками синего цвета. Участки карьеров на схеме обозначены черным контуром, границы заповедника «Денежкин Камень» — красным контуром, а охранный зона заповедника — зеленым контуром.

Исследование изменений лесной растительности по материалам космической

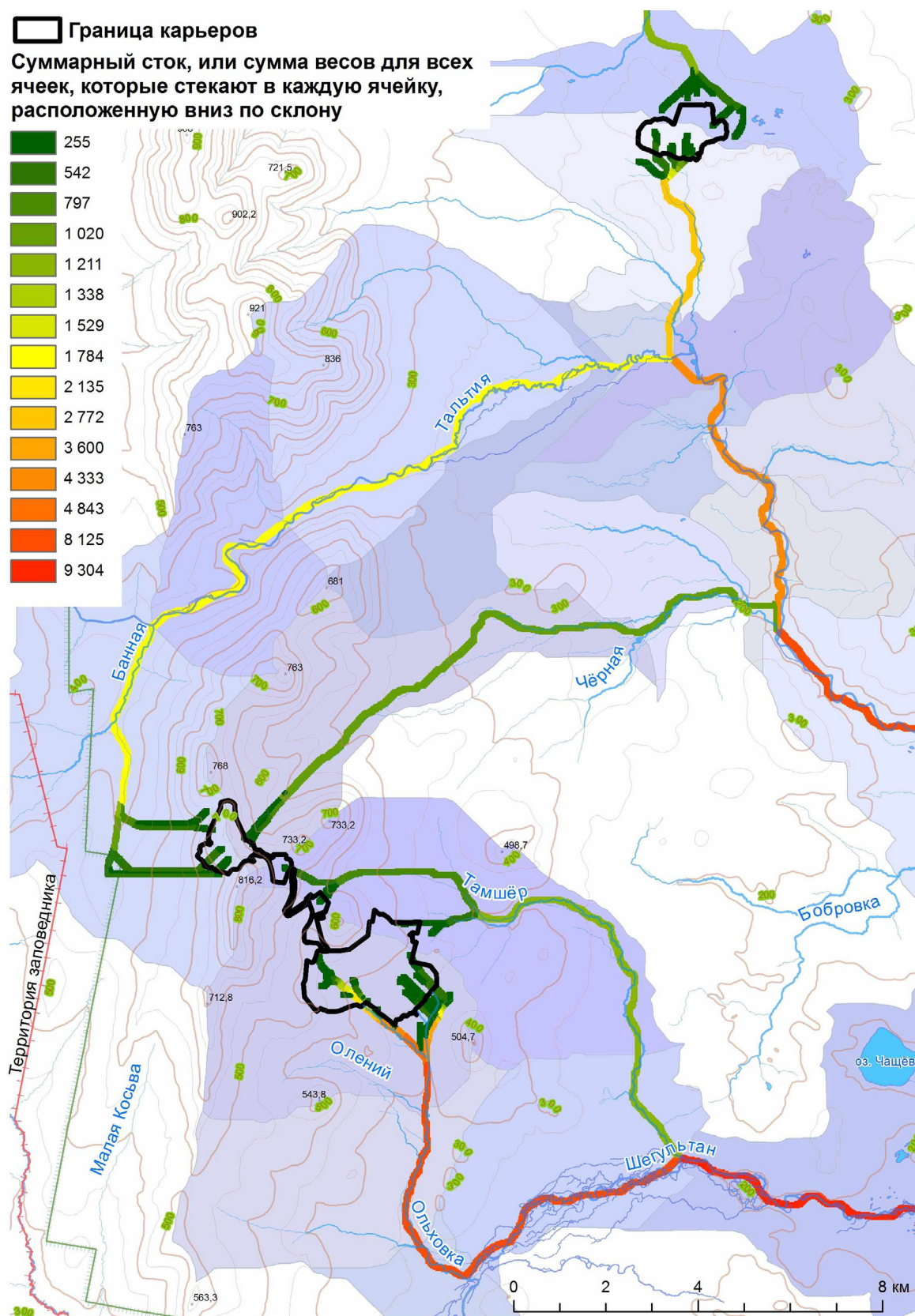


Рисунок 1. Суммарный сток с территории объектов Северного медно-цинкового рудника и рассчитанные водосборные области, участвующие в формировании водотоков

съёмки показало, что ее гибель в районе Тарньёрского рудника началась в 2010 г., а в 2015 г. начал гибнуть лес по долинам рек Тамшёр и Ольховка.

Согласно спутниковым данным, очаги гибели приурочены к рекам, в которые попадают стоки с карьеров (рис. 2) и полностью повторяют рассчитанную модель стока. На рисунке участки погибшей лесной растительности обозначены красным контуром, в качестве подложки использован снимок Sentinel-2 в комбинации каналов B11-B8a-B4, полученный 23.08.2021 г.

На территориях, не подвергающихся воздействию вод, стекающих с отвалов, значимых повреждений лесной растительности, по данным дистанционного зондирования, не обнаружено. Наблюдение подтверждено натурными обследованиями. В то же время в пределах участков, подвергающихся воздействию, натурное обследование показало наличие небольших участков под пологом леса, на которых начинают гибнуть травянистый и кустарничковый ярусы растительности, которые не были детектированы космосъёмкой.

Анализ приуроченности очагов гибели растительности к формам рельефа показал, что около 80% очагов расположены на пологих склонах (уклон не более 30%), на которых происходит задержание поллютантов. Также массовая гибель растительности наблюдается на заболоченных участках. На более крутых склонах признаки гибели растительности менее выражены. Например, вдоль р. Банная на за-

падных склонах хребта Шемур, имеющих уклон более 35%, площадь поврежденной лесной растительности минимальна.

С 2018 года территория, на которой выявлена гибель лесной растительности, увеличивается экспоненциально. В 2019 г. площадь погибшей растительности составляла 379.4 га, в 2020 г. — около 622.1 га, в 2021 г. — 712.5 га, в 2022 г. — 1149 га (рис. 3).

Практически все участки погибшего леса немного увеличились в ширину, некоторые в длину. Заметно увеличился участок погибшего леса в устье р. Тамшёр, вдоль Шегультаана, а также на выположенном участке в долине р. Тамшёр. В низовьях р. Безымянная (Чёрная) признаки гибели растительности были зафиксированы в 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования позволяют обнаружить участки, на которых гибнет древесный ярус, однако небольшие участки с погибшей травянистой и кустарничковой растительностью обнаружить дистанционными методами невозможно. Анализ данных показывает, что массовое усыхание лесной растительности приурочено к долинам рек, в которые попадают неконтролируемые стоки с медно-колчеданных отвалов Северного рудника, а также к самим отвалам. Территория, на которой выявлена гибель растительности, увеличивается экспоненциально с 2018 г. Анализ

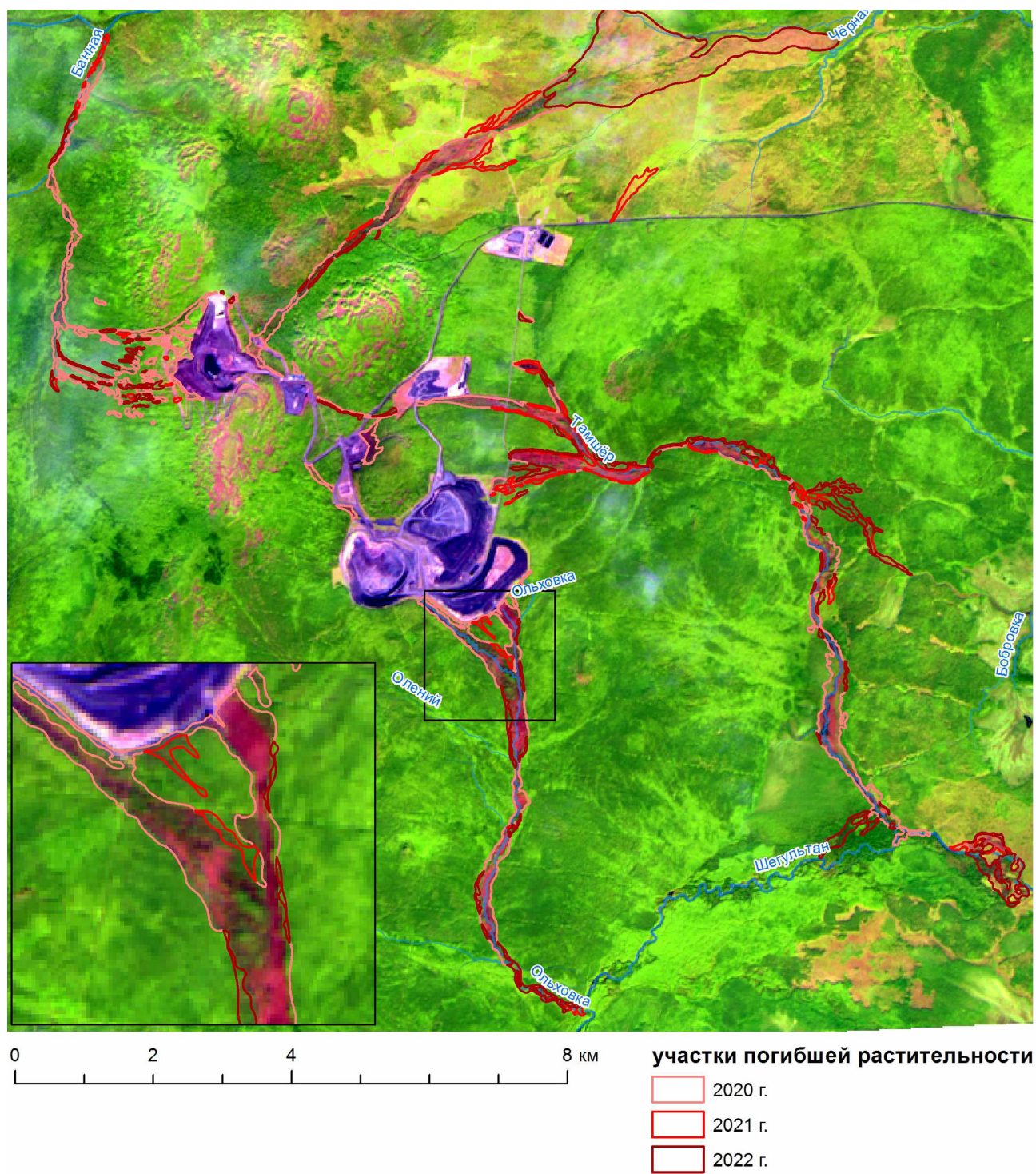


Рисунок 2. Фрагмент космического снимка Sentinel-2 с участками погибшей растительности



Рисунок 3. Динамика площади погибшей лесной растительности в период 2009–2022 гг.

приуроченности очагов гибели растительности к формам рельефа с использованием моделирования показал, что около 80% очагов расположены на пологих склонах (уклон не более 30%). Характерные особенности участков, на которых растительность погибла в результате химического отравления почв, отличаются от участков, пострадавших в результате воздействия иных негативных факторов, так как наблюдается

гибель всех компонентов растительности. Так, например, в случае поражения участков короедом травянистая и кустарничковая растительность не погибает, при гибели растительности в результате лесного пожара восстановление травянистой растительности происходит уже на следующий год, тогда как на исследованных участках химического загрязнения почв восстановление растительности не происходит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Владимирова Н. А., Квашнина А. Е.* Оценка масштабов гибели лесных экосистем в результате разработки месторождений Северного медно-цинкового рудника по серии космических снимков 2009–2018 гг. // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: Доклады VII Всероссийской конференции (Москва, 22-24 апреля 2019 г.).* М.: ЦЭПЛ РАН. 2019. С. 29–31
- Елсаков В. В.* Спектральные различия характеристик растительного покрова тундровых сообществ сенсоров Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18. № 4. С. 92–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-92-101.
- Ершов В. В.* Мониторинг состава атмосферных и почвенных вод в лесных экосистемах: достижения и перспективы // *Вопросы лесной науки.* 2020. Т. 3. № 2. С. 1–34. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-2-1-34.
- Квашнина А. Е., Владимирова Н. А.* Экспресс-оценка последствий неконтролируемого подотвального стока на северном медно-цинковом руднике и проблемы заповедника "Денежкин камень", с ним связанные // *География и современные проблемы географического образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Почетного члена Русского Географического Общества, доктора географических наук, профессора Василия Ивановича Прокаева, Екатеринбург, 16–20 сентября 2019 года.* Екатеринбург: УГПУ, 2019. С. 139–145.
- Квашнина А. Е.* Дешифрирование космических снимков района расположения Северного медно-цинкового месторождения с целью определения всех возможных потоков загрязненных вод и их воздействие на окружающую среду (2021 г.) // *Научные исследования в заповедниках и национальных парках Российской Федерации (2015–2021 гг.)* / Отв. ред. Д. М. Очагов. Выпуск 5. Симферополь: Бизнес-Информ, 2022. С. 152–153.
- Крылов А. М., Соболев А. А., Владимирова Н. А.* Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник.* 2011. № 4. С. 54–60.
- Никитина А. Д., Князева С. В., Гаврилюк Е. А., Тихонова Е. В., Эйдлина С. П., Королева Н. В.* Картографирование динамики растительного покрова территории национального парка «Куршская коса» по материалам космической съемки Alos и Sentinel-2 // *Вопросы лесной науки.* 2019. Т. 2. № 3. С. 1–21. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-21.
- Хамедов В. А., Копылов В. Н., Полищук Ю. М., Шимов С. В.* Использование данных дистанционного зондирования в за-

дачах лесной отрасли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 380–387.

Baumann M., Ozdogan M., Wolter P. T., Krylov A. M., Vladimirova N. A., Radeloff V. C. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // *Remote Sensing of Environment*, 2014. Vol. 143. P. 171–179.

REFERENCES

Baumann M., Ozdogan M., Wolter P. T., Krylov A. M., Vladimirova N. A., Radeloff V. C., Landsat remote sensing of forest windfall disturbance, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 143, pp. 171–179.

Elsakov V. V., Spektral'nye razlichija harakteristik rastitel'nogo pokrova tundrovyyh soobshhestv sensorov Landsat (Spectral Differences in Vegetation Characteristics of Tundra Communities of Landsat Sensors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No 4, pp. 92–101.

Ershov V. V., Monitoring sostava atmosferynyh i pochvennyh vod v lesnyh jekosistemah: dostizhenija i perspektivy (Monitoring the composition of atmospheric and soil waters in forest ecosystems: achievements and prospects), *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, Vol. 3, No 2, pp. 1–34.

Khamedov V. A., Kopylov V. N., Polishhuk Ju. M., Shimov S. V., Ispol'zovanie dannyh distantsionnogo zondirovaniya v zadachah lesnoj otrasli (The use of remote sensing

data in the tasks of the forest industry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No 2, pp. 380–387.

Krylov A. M., Sobolev A. A., Vladimirova N. A., Vyjavlenie ochagov koroeda-tipografa v Moskovskoj oblasti s ispol'zovaniem snimkov Landsat (Identification of foci of bark beetle-typographer in the Moscow region using Landsat images), *Forestry Bulletin*, 2011, No 4, pp. 54–60.

Kvashnina A. E., Deshifirovanie kosmosnimkov rajona raspolozhenija Severnogo medno-cinkovogo mestorozhdenija s cel'ju opredelenija vseh vozmozhnyh potokov zagrjaznennyh vod i ih vozdejstvie na okruzhajushhuyu sredu (2021 g.) (Interpretation of satellite images of the location of the Northern copper-zinc deposit in order to determine all possible flows of polluted waters and their impact on the environment (2021)), *Nauchnye issledovanija v zapovednikah i nacional'nyh parkah Rossijskoj Federacii (2015–2021 gg.)*, Vol. 5, Simferopol: Business-Inform, 2022, pp. 152–153.

Kvashnina A. E., Vladimirova N. A., Jekspress-ocenka posledstvij nekontroliruemo-go podotval'nogo stoka na severnom medno-cinkovom rudnike i problemy zapovednika "Denezhkin kamen", s nim svjazannye (Express assessment of the consequences of uncontrolled wastewater runoff at the northern copper-zinc mine and the problems of the Denezhkin Kamen reserve related to it), *Geografija*

i sovremennye problemy geograficheskogo obrazovanija: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 100-letiju so dnja rozhdenija Pochetnogo chlena Russkogo Geograficheskogo Obshhestva, doktora geograficheskikh nauk, professora Vasilija Ivanoviča Prokaeva, Ekaterinburg: USPU, 2019, pp. 139–145.

Nikitina A. D., Knjazeva S. V., Gavriljuk E. A., Tihonova E. V., Jejdlina S. P., Koroleva N. V., Kartografirovanie dinamiki rastitel'nogo pokrova territorii nacional'nogo parka "Kurshskaja kosa" po materialam kosmicheskoi s'emki Alos i Sentinel-2 (Mapping the dynamics of the vegetation cover of the Curonian Spit National Park on the

basis of Alos and Sentinel-2 satellite imagery), *Voprosy lesnoj nauki*, 2019, Vol. 2, No 3, pp. 1–21.

Vladimirova N. A., Kvashnina A. E., Ocenka masshtabov gibeli lesnyh jekosistem v rezul'tate razrabotki mestorozhdenij Severnogo medno-cinkovogo rudnika po serii kosmicheskikh snimkov 2009–2018 gg (Estimation of the extent of the destruction of forest ecosystems as a result of the development of deposits of the Northern copper-zinc mine based on a series of satellite images in 2009–2018), *Ajerokosmicheskie metody i geoinformacionnye tehnologii v lesovedenii, lesnom hozjajstve i jekologii: Doklady VII Vserossijskoj konferencii*, CEPF RAS, 2019, pp. 29–31.

DYNAMICS OF FOREST VEGETATION DESTRUCTION IN THE AREA ADJACENT TO THE COPPER MINE IN THE SVERDLOVSK REGION

A. E. Kvashnina ^{1*}, F. K. Vozmitel ¹, V. A. Khamedov ^{2,3}

¹ "Denezhkin Kamen" Russian Federal Nature Preserve,
6, Lenina Str., Severouralsk, 624480, Russia

² Siberian State University of Geosystems and Technologies
10, Plakhotnogo Str., Novosibirsk, 630108, Russia

³ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya Str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

*E-mail: zapov.dk@gmail.com

Received: 01.03.2023

Revised: 20.03.2023

Accepted: 22.03.2023

The study represents spatial and temporal analysis of the consequences of water pollution leading to vegetation destruction, caused by uncontrolled underspoil drain from a copper mine in the north of the Sverdlovsk region, based on GIS methods and satellite remote sensing data. Based on a 1:25 000 topography map DEM with filled sinks we built a flow accumulation model a watershed map. Examining the satellite imagery of the area dated from 2009 to 2023 we have noticed a distinct pattern of the vegetation destruction along the riverbeds located in the affected watersheds. Our ground observations and drone images have confirmed that the dead forest plots are located in the areas of flow accumulation, in the terrain depressions. The total area of forests affected by the uncontrolled underspoil drain from the copper mine gradually grows and has reaches 1140 ha.

Key words: *remote sensing, spatial hydrology analysis, runoff model, forest vegetation destruction, copper mine*

Рецензент: д. т. н. Ступин В. П.