

УДК 528.8.04

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

**Н. С. Косарев^{1,2}, А. А. Колесников^{1,2}, А. В. Резник¹,
Н. А. Немова¹, Д. С. Ожигин³**

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

E-mail: nemova-nataly@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

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

³*Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова,
просп. Нурсултана Назарбаева, 56, 100027, г. Караганда, Казахстан*

Предложен порядок получения и интерпретации различными средствами и методами геопространственных данных при ведении горных работ, повышающих точность оценки техногенно нарушенных земель. Разработанный подход базируется на принципе поэтапного перехода от территорий технологических объектов к их отдельным участкам. Показаны примеры интеграции данных спутниковой съемки местности, наземного лазерного сканирования и съемки с беспилотных авиационных систем в цифровые модели местности. Отмечено, что рациональное сочетание различных методов получения и интерпретации геопространственных данных позволяет формировать высокоточную геоинформационную основу цифровых двойников различных объектов, связанных с недропользованием.

Техногенно нарушенные земли, горные работы, пространственные данные, беспилотная авиационная система, лазерное сканирование, геоинформационные системы

DOI: 10.15372/FTPRPI20230617

К числу приоритетов социально-экономического развития Новосибирской области на период до 2030 г. согласно региональной стратегии относится создание современной и безопасной среды для жизни. Устойчивое функционирование экономического комплекса нельзя рассматривать без учета возрастающих требований к рациональному, технологически эффективному и экологически безопасному природо- и недропользованию [1]. На действующих предприятиях, связанных с нарушением земной поверхности, в том числе при освоении месторождений полезных ископаемых открытыми горными работами, большие площади земель, имеющие различное назначение,

Исследование выполнено за счет средств гранта РНФ № 23-27-10057 и гранта Новосибирской области р-60 “Разработка методики оценки состояния техногенно нарушенных земель Новосибирской области и прогнозирование направлений их альтернативного использования”.

ценность и пригодность к восстановлению, выводятся из оборота на длительные сроки. Такие участки с неполной рекультивацией частично возвращаются для нового использования или безвозвратно уходят из нормальной хозяйственной деятельности [2–4].

Важным инструментом для оценки и разработки мероприятий, ориентированных на рациональное взаимодействие природных комплексов и техногенно нарушенных земельных участков, являются информационно-аналитические базы данных, геоинформационные системы (ГИС), карты инженерно-геологического и эколого-экономического районирования. Использование ГИС-технологий, методов пространственного анализа, моделирования, кластеризации с привлечением геопространственных данных, наилучших доступных технологий, в том числе ориентированных на применение искусственного интеллекта, позволяет автоматизировать процессы создания 3D-карт с зонированием участков и районов по уровню геоэкологической стабильности и уязвимости. Это способствует решению ряда научных и практических задач устойчивого развития технологических объектов и территорий [5].

Благодаря достоверным и представительным геопространственным данным — ключевого элемента при реализации концепции “цифрового месторождения” — открываются возможности значительного повышения качества и производительности маркшейдерских работ по отображению наземной и подземной ситуации на планах горных работ, точному измерению подлежащих нарушению и выработанных площадей.

Получение разнообразных геопространственных данных в рамках классических и инновационных геодезических технологий связано с использованием глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), лазерного сканирования, фотограмметрии для дистанционного зондирования [6]. Все наблюдения могут выполняться в режиме реального времени или с последующей обработкой. Способы съемки с применением электронных тахеометров позволяют получать данные с точностью до 1 мм. ГНСС-технологии, использующие наблюдения навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и BEIDOU, характеризуются точностью от миллиметров до нескольких метров, что зависит от выбранного метода определения координат, включая абсолютный, дифференциальный и относительный. Наземное и воздушное, стационарное и мобильное лазерное сканирование также обеспечивает высокую скорость и точность сбора данных для создания 3D-моделей. Портативное лазерное сканирование, основанное на технологии SLAM (одновременная локализация и картографирование) может использоваться для обследования горных тоннелей, решения задач, связанных со съемкой закрытых пространств. Мощным инструментом для получения высокоточных геопространственных данных является аэрофотосъемка беспилотными авиационными системами (БАС). Все эти технологии достаточно активно используются в добывающей отрасли для планирования и управления горными работами, дифференциации участков по горнотехническим и геодинамическим условиям отработки, расчета объемов извлекаемой горной массы и получаемых полезных ископаемых, их потерь и движения, мониторинга деформаций и оползней, составления документации, а также при оценке динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов [7–9].

Высокоточная съемка больших площадей, как правило, дорогостоящая. В этом случае хорошей альтернативой может служить спутниковая съемка, которая позволяет проводить исследования динамики [10–11] процессов на земной поверхности в случае отсутствия необходимости в детальных измерениях [12–15]. Кроме того, большинство спутниковых систем может вести съемку в мультиспектральном варианте для оценки состояния водоемов, определения глубины, делать количественную оценку ряда экологических показателей.

Рассмотренные способы съемки, форматы представления получаемых с их помощью пространственных данных и разрабатываемые модели требуют в рамках ГИС применения разнообразных методов для создания единого цифрового геоинформационного пространства [16], максимально точно отражающего ту геосреду, в которой реально работают горнодобывающие предприятия. Возможные проблемы, такие как различия в моделях данных, контурах объектов и временных параметрах, могут быть решены с помощью стандартов инфраструктуры пространственных данных, метаданных и технологий машинного обучения [17]. Программные комплексы позволяют интегрировать данные на физическом, логическом и семантическом уровнях [18]. Возможные конфликты, например различия в моделях хранения, могут быть решены с помощью различных подходов к интеграции данных в ГИС, включая технологии искусственного интеллекта. При проектировании и построении архитектур геоинформационных систем и сервисов целесообразно учитывать открытые стандарты и рекомендации, предоставляемые международной организацией Open Geospatial Consortium.

Цель настоящей работы — разработка методического подхода к комплексированию сбора и использования разнородной информации, получаемой в ходе дистанционного зондирования участков земель различными способами для преодоления ограничений и недостатков, получения максимально полных и достоверных сведений для оценки техногенно нарушаемых земель.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Концептуально предлагаемый подход состоит из поэтапного перехода от общих характеристик районов размещения технологических объектов к их отдельным участкам с получением и интерпретацией комплекса разномасштабных геопространственных данных для решения задач, связанных с контролем, оценкой и прогнозированием техногенных изменений в зоне ведения горных работ и их влияния на окружающую среду. Согласно способу получения, обработки, отображения и интерпретации геопространственных данных для кластеризации неоднородности техногенно измененных территорий [19] при их частичном развитии [20, 21], реализация разработанного алгоритма предполагает выполнение следующих основных последовательных или параллельных этапов:

- сбор и анализ спутниковых снимков и цифровых карт, предварительная оценка неоднородных пространственных данных, выделение областей для крупномасштабной съемки;
- построение ортофотоплана по данным аэрофотосъемки, его дешифрирование и создание предварительной цифровой модели местности (ЦММ) техногенно нарушенного участка;
- съемка наземным лазерным сканером или роботизированным тахеометром с обработкой результатов сканирования и созданием ЦММ техногенно нарушенного участка с максимально высокой точностью детализации;
- объединение предварительной цифровой модели с цифровой метрической геоинформационной трехмерной высокоточной моделью техногенно нарушенных земель в едином геопространстве и создание уточненной ЦММ техногенно нарушенного участка земли;
- ранжирование земель для выявления структурных особенностей, нарушений и неоднородностей строения участков, опасных и потенциально опасных зон;
- формирование базы данных техногенно нарушенных участков, оценка и определение границ санитарно-защитных зон, построение динамически изменяющейся трехмерной модели наземной и подземной частей рассматриваемых объектов недропользования и прилегающих к ним зон для текущей оценки и прогнозирования будущего состояния.

Результатами использования данного подхода являются:

- мониторинг изменения площади и объемов поверхности карьерной выемки и формируемых отвалов, складов, расчет объемов вскрышных и добычных работ;
- учет различных неоднородностей техногенно нарушенных участков, включая опасные и особо опасные элементы;
- оценка устойчивости массива горных пород с количественным анализом деформаций на основе геомеханического мониторинга;
- количественный и качественный контроль и учет охранных и санитарно-защитных зон с учетом климатических особенностей региона и оценки природно-экологических рисков.

Такой порядок детального изучения обеспечивает возможность достоверного выявления топологических признаков и свойств измененных участков, предоставляет информацию об их спектральных характеристиках, служит измерительной основой для проведения комплексного геоэкологического мониторинга, оценки состояния и ранжирования техногенно нарушенных земель по уровню влияния на компоненты окружающей среды.

При интеграции данных приходится сталкиваться с разными метриками, связанными с большим количеством систем координат, применяемых в геодезии, широким диапазоном точности полученных данных, разнообразием их форматов и шкал измерения. Это может способствовать построению недостоверной ЦММ и неправильной интерпретации ранжирования земель по уровню влияния угроз на компоненты окружающей среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для условий Колыванского месторождения антрацита (участок Восточный) в Новосибирской области выполнена работа по изучению динамики трансформации земель при ведении открытых горных работ с использованием спутниковых снимков оптического спектра по различным датам [20]. Построением ЦММ объекта и ее применением для предварительной оценки изменений земель в зоне ведения горных работ показано, что общая занимаемая площадь разрезов увеличилась с 3.50 км² в 2015 г. до 9.41 км² — в 2021 г., отвалов — с 5.06 до 14.04 км² соответственно. Основная часть этих земель безвозвратно утеряна для сельскохозяйственных целей, геоэкологическая напряженность в регионе повышается. Продолжение исследований на данном объекте предполагает учет полученных результатов при создании различных по назначению и детальности цифровых моделей. При помощи таких моделей дифференцируются участки и пласты месторождений по уровням их геотехнологической, квалитетической, экологической значимости с учетом сложности строения и неоднородности свойств горных пород и угля, рыночного спроса на него.

Более детально предлагаемый подход реализован для условий одного из отрабатываемых рудных месторождений в Казахстане. Анализ спутниковых снимков и цифровых карт позволил предварительно оценить и выделить неоднородные по характеру изменений области (рис. 1) для последующей их съемки другими способами в крупном масштабе.

Для сбора более точных геопространственных данных, на основе которых создан ряд ЦММ анализируемого участка, использовались квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro PPK Topodrone с установленным на борту мультисистемным геодезическим ГНСС приемником и лазерный сканер Leica HDS8800. Порядок создания ЦММ на основе наземного лазерного сканирования (НЛС) и аэрофотосъемки с БАС состоял из нескольких этапов.

На первом этапе для НЛС и аэрофотосъемки с БАС сформирована сеть точек съемки. Их координаты определялись относительным методом в статическом режиме, а координаты опорных марок — в режиме реального времени в зависимости от заранее выбранной базовой

станции в единой координатной системе отсчета. Правильно созданное опорное обоснование, представляющее собой замаркированные на местности пункты, служит важным фактором, влияющим на точность обработки материалов.



Рис. 1. Спутниковый снимок техногенно измененных земель обрабатываемого рудного месторождения с участком для дополнительной оценки

На втором этапе проведена НЛС с получением облака точек, обеспечивающих более высокую точность построения ЦММ. Камеральная обработка полученных результатов осуществлялась с применением специальных программ (Trimble Business Center, Magnet Office Tools Complete, Trimble HD-GNSS, Topcon Tools, Justin и др.). Из-за технической невозможности сплошного сканирования всего изучаемого участка исследование проводилось снизу вверх. Из-за этого часть площади изучаемого участка попала в область, скрытую от лазерного сканера, что не позволило определить координаты поверхности в данных точках (светлые пятна на рис. 2).



Рис. 2. Модель участка отвала со “слепыми” (светлыми) зонами, построенная с применением данных наземного лазерного сканирования

Третий этап — съемка БАС с выполнением фотограмметрических работ для построения стереомодели по снимкам, полученным в результате аэрофотосъемки с целью минимизации “слепых” зон. Обработка данных телеметрии и полученных снимков проведена с применением программного обеспечения (ПО) Topodrone Post Processing. Для получения облака точек вычислялась траектория движения квадрокоптера и рассчитывались координаты центров фотоснимков на момент срабатывания затвора. Выполнены фототриангуляция и калибровка камеры по опорным маркам на земной поверхности, уточнены коэффициенты калибровки и матрица корреляции. Сгенерированное в ПО Agisoft Metashape 2.0 плотное облако точек экспортировано в формат LAZ для дальнейшей интеграции в ПО Maptek I-Site Studio 5.0 (рис. 3), которое автоматически создает высокоточную структурированную 3D-модель местности. На ее основе формируется матрица территории и высот.

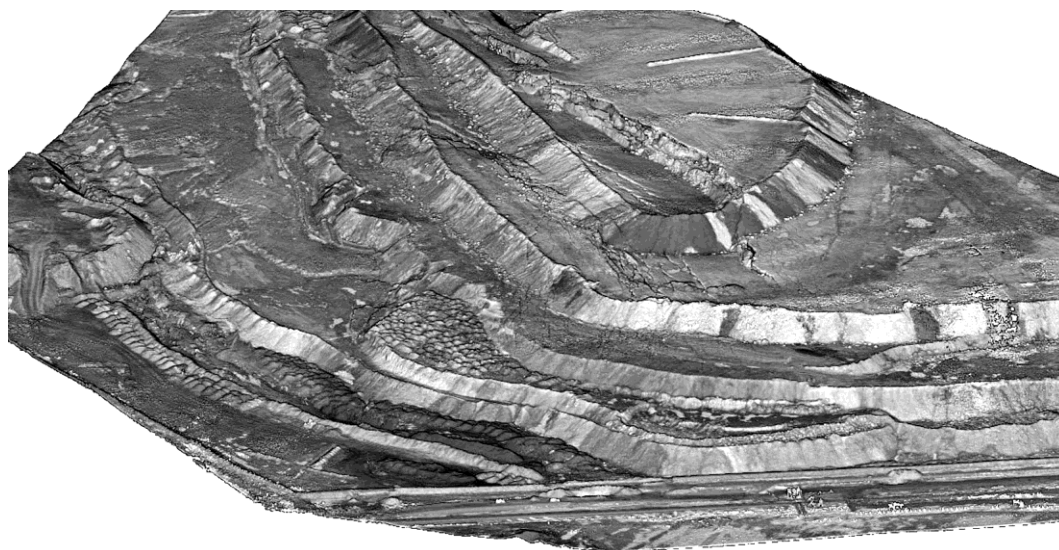


Рис. 3. Модель участка отвала, построенная с применением данных аэрофотосъемки

На четвертом этапе создана уточненная ЦММ на основе данных НЛС и аэрофотосъемки с БАС в ПО Maptek I-Site Studio 5.0. При интеграции данных облако точек использовалось как калибровочное, определенное с более высокой точностью. Полученное изображение не содержит “слепых” зон, возникающих при съемке техногенных объектов (отмеченные области на рис. 4).

Необходимость дополнительной геометрической обработки исходных материалов спутниковых снимков для получения более точных контуров техногенных нарушений обусловлена влиянием искажений, возникающих в процессе формирования изображений под воздействием различных факторов. В такой ситуации для повышения точности построений ЦММ, выполнения расчетов по определению границ техногенно нарушенных земель необходимо дополнительно использовать БАС и НЛС. Их применение позволяет получить уточненные параметры всех элементов карьера с пространственным разрешением $\pm 0.5 - 1.0$ см. Такой точности в целом достаточно для решения следующих задач: оценки и обоснования параметров рекультивации и восстановления техногенно нарушенных земель; контроля охранных и санитарно-защитных зон с учетом розы ветров, климатических особенностей оцениваемого региона; мониторинга и прогнозирования устойчивости нетронутых и нарушенных массивов горных пород; оценки природно-экологических рисков. Высокоточное картирование неоднородностей, которые могут представлять опасные и особо опасные зоны, дает возможность исключить либо снизить негативное влияние на компоненты окружающей среды.

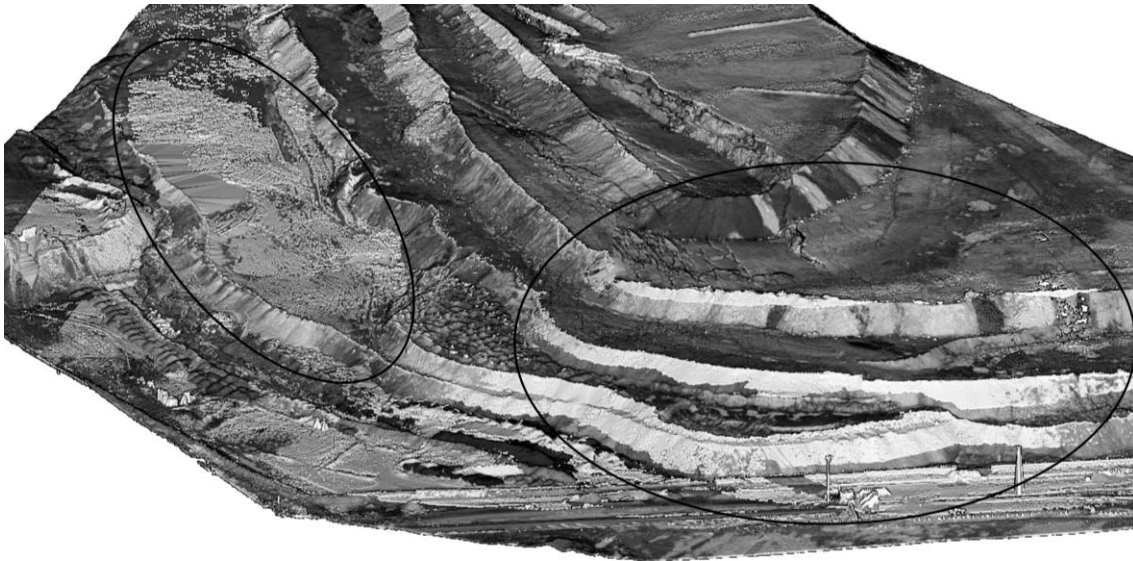


Рис. 4. Совмещенная модель участка отвала по данным аэрофотосъемки и наземного лазерного сканирования

ВЫВОДЫ

Разработанный подход к получению и интерпретации геопространственных данных для построения высокоточных карт и оценки техногенно нарушенных земель при ведении горных работ с прилегающими к ним территориями базируется на принципе поэтапного перехода от изучения общих технологических объектов к изучению отдельных участков. Рациональное сочетание различных методов получения пространственных данных техногенно нарушенных земель (спутниковые снимки, аэрофотосъемка, ГНСС-технологии, лазерное сканирование) позволяет создавать высокоточную геоинформационную базу, являющуюся основой для создания цифровых двойников местности, мониторинга горных массивов, определения изменений объемов горных выработок и перемещенной горной массы, контроля деформаций и санитарно-защитных зон, управления запасами и их качеством.

Предложенный методический подход, развитие которого предполагает объединение и совместное использование других данных, интегрируемых в геологических, гидрогеологических, геомеханических, геотехнологических моделях месторождений, целесообразно использовать для решения широкого спектра задач горнодобывающих предприятий и контролирующих органов по рациональному, ресурсосберегающему и экологически сбалансированному недропользованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулина И. Е., Хоменко И. В. Системообразующие факторы в развитии регионального социально-экономического комплекса // Региональная экономика: теория и практика. — 2009. — № 20. — С. 20–26.
2. Зеньков И. В. Технологии рекультивации земель и формирования архитектуры техногенных ландшафтов для предприятий горнодобывающей промышленности с открытыми горными работами. — Красноярск: СФУ, 2022. — 800 с.
3. Басова И. А., Прохоров Д. О., Пьянков С. В., Трубина Л. К. Мониторинг земель, занятых техногенными минеральными образованиями // Вестн. СГУГиТ. — 2022. — Т. 27. — № 4. — С. 138–149.
4. Соколов Э. М., Качурин Н. М., Мелехова Н. И. Рекультивация отвалов отработанных шахт подмосковного бассейна // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2010. — Вып. 1. — С. 102–105.

5. **Архипова Ю. А., Бубнова М. Б.** Мониторинг и оценка экологического воздействия техногенной деятельности в Дальневосточном горнопромышленном регионе России // Экологические системы и приборы. — 2019. — № 6. — С. 3–8.
6. **Акулова Е. А., Титов М. О.** Методы получения пространственных данных в современных условиях // Горн. журн. — 2017. — № 6. — С. 79–86.
7. **Остапенко С. П., Месяц С. П.** Изучение по спутниковым данным динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов // ФТПРПИ. — 2022. — № 5. — С. 155–166.
8. **Ozhygin D., Šafář V., Dorokhov D., Ozhygina S., Ozhygin S., and Staňková H.** Terrestrial photogrammetry at the quarry and validating the accuracy of slope models for monitoring their stability, IOP Conf. Series: Earth Env. Sci., 2021, Vol. 906, No. 1. — 012062.
9. **Labant S., Bindzarova Gergelova M., Kuzevicova Z., Kuzevic S., Fedorko G., and Molnar V.** Utilization of geodetic methods results in small open-pit mine conditions: a case study from Slovakia, Minerals, 2020, Vol. 10. — P. 489.
10. **Шуньлин Жуань, Даньян Лю, Цинхуа Гу, Ин Цзин** Метод “интеллектуального” обнаружения трещин в бортах карьеров на основе усовершенствованной архитектуры Mask R-CNN // ФТПРПИ. — 2022. — № 6. — С.177–193.
11. **Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А.** Наземное лазерное сканирование. — Новосибирск: СГГА, 2009. — 261 с.
12. **Schmitz B., Holst C., Medic T., Lichti D., and Kuhlmann H.** How to efficiently determine the range precision of 3D terrestrial laser scanners, Sensors, 2019, Vol. 19. — P. 1466.
13. **Kekeç B., Bilim N., Karakaya E., and Ghiloufi D.** Applications of terrestrial laser scanning (TLS) in mining: A review, Türkiye Lidar Dergisi, 2021, Vol. 3, No. 1. — P. 31–38.
14. **Нурмухаметов А. Л., Сидорчук Д. С., Коноваленко И. А., Никоноров А. В., Грачева М. А.** Спектральная гармонизация данных БПЛА и данных спутниковой съемки для нужд точного земледелия // Информационные процессы. — 2022. — Т. 22. — № 4. — С. 335–346.
15. **Гаврилов В. Н., Немова Н. А., Резник А. В., Косарев Н. С., Колесников А. А.** О необходимости комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных горными работами земель // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — № 10. — С. 76–87.
16. **Наговицын О. В., Степачева А. В.** Формирование цифрового двойника месторождения твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С.171–180.
17. **Воскобойникова А. А.** Разработка архитектуры интеграции нескольких информационных систем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — Т. 4. — № 3 (40). — С. 12–15.
18. **Новоселова О. В., Волкова Г. Д., Гаврилов А. Г.** Моделирование интегрированной среды поддержки создания прикладных автоматизированных систем // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. — 2014. — № 1. — С. 81–91.
19. **Пат. 2806406 РФ, МПК G01C 11/04 (2006.01), G06T 17/05 (2011.01).** Способ получения, обработки, отображения и интерпретации геопространственных данных для кластеризации неоднородности техногенно измененных территорий / А. В. Резник, В. Л. Гаврилов, Н. А. Немова, Н. С. Косарев, А. А. Колесников // Оpubл. в БИ. — 20232. — 2022125547.
20. **Колесников А. А., Косарев Н. С., Немова Н. А., Резник А. В., Платонов Т. А.** Создание базы данных техногенно нарушенных территорий Новосибирской области // Вестн. СГУГиТ. — 2023. — Т. 31. — № 5. — С. 80–92.
21. **Гаврилов В. Л., Немова Н. А., Резник А. В., Косарев Н. С., Смык М. И., Медведева К. Е.** О нарушении земель при освоении МСБ Восточной части Новосибирской области // Фундаментальные прикладные вопросы горных наук. — 2022. — Т. 9. — № 1. — С. 69–78.

Поступила в редакцию 24/V 2023

После доработки 11/VII 2023

Принята к публикации 16/XI 2023