
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЗЕМЕЛЬ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ, НАРУШЕННЫХ ПРИ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ ОСВОЕНИИ

© 2023 г. Е. А. Еременко^{а, *}, Ю. Р. Беляев^{а, **}, С. И. Болысов^{а, ***},
А. В. Бредихин^{а, ****}, В. Р. Битюкова^{а, *****}

^а*Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**E-mail: eremenkoeaig@gmail.com*

***E-mail: yrbel@mail.ru*

****E-mail: sibol1954@bk.ru*

*****E-mail: avbredikhin@yandex.ru*

******E-mail: bituykova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 14.09.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Предложена методика расчета интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности горнопромышленных территорий с точки зрения их влияния на экологическую обстановку на Байкальской природной территории. Описанный подход позволяет детально охарактеризовать последствия добычи полезных ископаемых для экологической ситуации в регионе, так как учитывает не только площадь нарушенных земель, но и другие факторы, влияющие на возможность транспорта загрязнителей и степень их опасности (в частности, тип добываемого сырья, геоморфологическую позицию разрабатываемых месторождений, степень антропогенной трансформации рельефа, состав антропогенных отложений и степень рекультивации нарушенных земель). Для апробации методики выполнен расчет интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель в пределах всех муниципальных образований Байкальской природной территории по состоянию на 2020 год, проведено ранжирование их по значению показателя и составлена соответствующая карта.

Ключевые слова: интегральный показатель, антропогенный рельеф, добыча угля, россыпные месторождения, антропогенное воздействие

DOI: 10.31857/S0869607123030047, EDN: YJNSKR

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская природная территория (БПТ) включает регионы, испытывающие антропогенное воздействие на протяжении нескольких последних столетий. Согласно Распоряжению Правительства РФ от 27 ноября 2006 г. № 1641-р “Об утверждении границ Байкальской природной территории и ее экологических зон” в состав БПТ входят юго-восточная часть Иркутской области, южная и центральная части Бурятии, а также юго-западная часть Забайкальского края (всего – 37 муниципальных образований, включая районы и городские округа). Богатство региона полезными ископаемыми предопределило широкомасштабные разведочные работы в первой половине XX века, а во второй половине XX века и XXI веке – активное развитие горнодобыва-

ющей отрасли. Горнодобывающие предприятия связали автомобильные и железные дороги, вблизи них возникли крупные селитебные центры. Строительство зданий и сооружений в ходе горнопромышленного, транспортного и селитебного освоения, а также, собственно, разработка сырья сопровождались существенным изменением естественного рельефа БПТ.

Антропогенная трансформация рельефа – это комплекс разносторонних воздействий деятельности человека на рельеф территории, приводящий к последующим изменениям в природных экосистемах, а также, нередко, к возникновению негативных и опасных экологических явлений и состояний. Хозяйственная деятельность человека в пределах БПТ сопровождалась воздействием на рельеф, которое было как прямым (изменение морфологии рельефа путем создания антропогенных форм и трансформации облика естественных форм рельефа), так и косвенным (изменение условий протекания геоморфологических процессов, в частности, характера растительного покрова, геокриологических условий, параметров тепломассопереноса, гидрологических характеристик и пр.). Оценка геоморфологических опасностей, возникающих вследствие антропогенной трансформации рельефа, необходима и важна для сохранения и поддержания уникальных природных экосистем БПТ. Как и любая комплексная оценка она подразумевает определенную последовательность действий по систематизации и анализу разнородной географической информации, ее интегрирование и представление в виде одного или нескольких интегральных показателей. К настоящему моменту в отечественной и зарубежной науке накоплен большой арсенал подходов и методик оценки природных и природно-техногенных систем, а также рельефа для целей природопользования. Преимущественно, это оценки потенциальных опасностей и рисков (как в комплексе, так и по разным видам геоморфологических и геологических опасностей), в меньшей степени – величины антропогенного воздействия на рельеф.

ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Со второй половины XX века комплексные оценки используются в географических исследованиях для характеристики систем, объектов и/или процессов на основе изучения нескольких показателей их свойств, которые могут быть как качественными, так и количественными [18]. При этом объектом комплексной оценки может являться как состояние систем, так и связи между их компонентами [23, 24, и др.]. Основным итогом оценки является карта, отражающая пространственное распределение комплексного показателя. Описанный подход к оценке реализован, в частности, при оценке экологического состояния и ситуации [8, 9, 20], экологической напряженности [7], напряженности геоморфологических систем и обстановок [28]. Наиболее востребованной практикой являются исследования, направленные на комплексную оценку опасностей и риска [19, 22, 27].

Исследование взаимодействия рельефа и хозяйственной деятельности в пределах БПТ и ее окрестностях в течение последних 20–30 лет проводилось по двум ключевым направлениям: 1) изучение геоморфологических опасностей и связанных с ними рисков хозяйственного освоения территории; 2) изучение влияния хозяйственной деятельности на естественный рельеф. Наряду с анализом отдельных сторон функционирования эколого-геоморфологических систем освоенных территорий выполнялись интегральные оценки как рельефа в целом для нужд природопользования, так и нарушенности природных геосистем антропогенным воздействием.

В ряде научных работ отечественных исследователей затрагивались вопросы, связанные с геоморфологическими и геологическими рисками природопользования в Сибирском регионе. В частности, выполнены оценки селевого риска [5] и риска землетрясений в экономических показателях [17], оценка селевого риска для транспорт-

ных коммуникаций [33]. Непосредственно для территории Иркутской области оценка геоморфологических опасностей и рисков выполнена С.Б. Кузьминым [25], геоморфологической безопасности природопользования по методике [18] проведена Баженовой О.И. и соавторами [6] для верхней части бассейна р. Ангары.

В названных работах естественный рельеф и геоморфологические процессы рассматриваются как источники потенциальной опасности для хозяйства и населения. В то же время, хозяйственная деятельность и сопутствующее изменение рельефа сами являются источником потенциальных и фактических угроз для жизнедеятельности людей и для окружающей среды в целом. Эта сторона взаимодействия хозяйства и окружающей среды гораздо шире освещена в научных публикациях по изучаемому региону, особенно в последние 10 лет. Вопросы нарушенности природной среды антропогенным воздействием в пределах БПТ рассматривались во множестве научных работ, разработаны несколько методик комплексной оценки антропогенной нарушенности, основанных на взвешенном учете разнородных критериев. Коллективом авторов [12] выполнен обзор основных результатов работ сотрудников Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН в указанном направлении с 1960-х годов по 20-е годы XXI века. Составлена карта экологического зонирования БПТ, учитывающая геоморфологическое строение территории зоны атмосферного влияния и опасность выбросов загрязняющих веществ в ее пределах. Определены критерии экологической допустимости размещения хозяйственных объектов в центральной экологической зоне БПТ, подготовлены рекомендации для учета в стратегиях территориального развития. Одним из крупных геоинформационных проектов, реализованным в последние годы, является создание цифрового атласа “Байкальский регион: общество и природа” [4].

Значимость оценки экологического потенциала для обеспечения устойчивого развития БПТ подчеркивается в работах И.Н. Владимирова [13–15]. С использованием средств GRID-моделирования проведена [14] оценка экологического потенциала и степени устойчивости геосистем Байкальской Сибири. Оценка экологической стабильности БПТ с учетом состава земельного фонда и природных условий выполнена Лопаткиным Д.А. [29]. В то же время, напрямую нарушенность рельефа в представленных оценках не учитывалась, методы оценки ее степени пока не разработаны. Коноваловой Т.И. [21] предложена методология исследования трансформации геосистем БПТ, учитывающая их динамические параметры, и показано, что интенсивная хозяйственная деятельность способствует интенсификации природных трендов трансформации геосистем. Это в полной мере относится и к геоморфологическим системам освоенных территорий, особенно, к районам разработки месторождений полезных ископаемых. Повышение уклонов местности, появление огромного количества рыхлого материала и незадернованность поверхности являются причинами резкой активизации целого спектра геоморфологических процессов, обеспечивающих транспорт вещества (делювиального смыва, линейной эрозии и пр.). Для территории южного Прибайкалья и хребта Малый Хамар-Дабан составлены карты антропогенной нарушенности геосистем [31, 32].

В пределах БПТ наибольшим спектром воздействий на окружающую среду характеризуется промышленное природопользование, в частности горнодобывающая деятельность. Результаты анализа экологических последствий добычи полезных ископаемых в СФО показывают, что в 2015 г. на долю округа пришлось 70% всего объема отходов горнодобывающей промышленности в РФ [26]. При этом отходы производства (шлаки, шлам, вскрышные породы и пр.) сосредотачиваются на узко локальных участках, слагая или заполняя формы антропогенного рельефа. Антропогенный рельеф, нередко, является крайне нестабильным, подверженным разрушению природными факторами. Это определяет повышенный риск распространения отходов горнопромышленного производства за пределы зоны непосредственной добычи сырья, а значит – необходимость оценки устойчивости антропогенно нарушенных террито-

рий, в частности, созданного в районах разработки месторождений искусственного рельефа. Область негативного воздействия горнодобывающих предприятий на окружающие ландшафты значительно превышает площадь земельного отвода, что существенно ухудшает экологическую обстановку [30]. Одной из наиболее комплексных оценок влияния горнодобывающей промышленности Байкальского региона и Монголии на окружающую среду является оценка (а также соответствующие карты и методология), выполненная А.Д. Абалаковым и Н.Б. Базаровой [2]. Ими предложена система показателей, с помощью которых проведены оценка и картографирование техногенного воздействия на локальном (участки разработки месторождений) и площадном (административные районы) уровнях. Составлена карта, иллюстрирующая воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду в бассейне озера Байкал [1]. В отдельных работах [10, 11] подчеркивается влияние горнодобывающей деятельности на изменение геолого-геоморфологических условий (наряду с другими направлениями воздействия на окружающую среду). В то же время, нельзя согласиться с выводом авторов о том, что “для такого типа нарушений отрицательные последствия ограничиваются районом месторождения” [11, с. 99], поскольку он не учитывает каскадности функционирования ландшафтов (и, в частности, рельефа) речных бассейнов, затронутых добычей сырья. Предложенная методика балльной оценки воздействия была реализована на примере Ишидэйского каменноугольного и Хандинского бурогоугольного месторождений Иркутской области [11].

Нарушенные в результате разработки сырья территории после отработки месторождений переходят в естественный режим развития, однако ряд геоморфологических и других природных процессов развивается здесь, нередко, с существенно большей интенсивностью, чем в не затронутых освоением районах. Установлено, что экологические последствия разработки золоторудных месторождений (в настоящее время не действующих) напоминают о себе и в настоящее время. Так, значительная часть токсичных веществ сосредоточена в хвостохранилищах и отвалах золотоизвлекательных фабрик, являющихся фактическими источниками загрязнения [3, 16].

Таким образом, к настоящему времени накоплен большой опыт в области оценки нарушенности природных геосистем антропогенным воздействием, в том числе, непосредственно для БПТ. В то же время, трансформация рельефа в результате горнопромышленного освоения и ее последствия для природной среды в пределах территории БПТ изучены достаточно слабо. Представляется, что учет площадей нарушенных земель, уклонов местности – далеко не полный спектр критериев оценки нарушенности рельефа, который должен быть использован для интегральной оценки последствий вмешательства человека в функционирование рельефа. Кроме того, очевидна актуальность подобной оценки для территории БПТ в целом с учетом специфики месторождений в пределах отдельных муниципальных образований, что позволит выделить наиболее проблемные районы, а также разработать более эффективные меры по снижению существующих рисков. **Целью** представленного исследования являлась разработка методики интегральной оценки эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных горнопромышленной деятельностью в пределах БПТ, а также ее апробация, в том числе, для отдельных муниципальных образований. **Методика** интегральной оценки эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных при эксплуатации месторождений, разрабатывалась с учетом охарактеризованных выше подходов и нацелена на создание пространственной картины антропогенной трансформации рельефа, ее негативных и опасных для окружающей среды последствий.

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ

Для разных типов природопользования характерны различные масштабы и типы антропогенных трансформаций рельефа. В пределах населенных пунктов БПТ ре-

льеф, безусловно, был изменен в ходе освоения. При этом чем более крупным является населенный пункт, тем, как правило, более масштабны эти изменения. Однако, планируя рельеф городских территорий, человек стремится создать не только безопасную, но и комфортную среду. Поэтому антропогенный рельеф городов (насыпи, выемки и др.), как правило, сравнительно стабилен. Совершенно иная ситуация создается в районах добычи полезных ископаемых, где трансформация рельефа происходит в процессе вскрышных работ, выемки полезного компонента (сырья) и образуемый антропогенный рельеф, нередко, практически не рекультивируется. Разрабатываемые, отработанные и заброшенные месторождения в пределах БПТ представляют собой участки нарушенных земель, где созданы масштабные комплексы антропогенного рельефа (карьеры, прорезы, штольни, канавы, отвальные поля, терриконы, площадки хвостохранилищ и пр.) (рис. 1). Грунт, слагающий эти новообразованные формы рельефа, чаще всего, не закреплен или слабо закреплен растительностью. Как следствие, загрязняющие вещества из отвалов карьеров и хвостохранилищ имеют возможность поступать в речную сеть с поверхностным стоком. Кроме того, линейная эрозия и делювиальный смыв, развивающиеся в контурах нарушенных земель, способствуют активизации поступления рыхлого материала в водотоки и, тем самым, увеличению мутности воды. Необходимо отметить, что чем более свежими (молодыми) являются антропогенные формы в пределах месторождений (как отработанных, так и разрабатываемых), тем активнее они размываются, так как на образование растительного покрова на отвалах и стенках карьеров уходят первые десятки лет. В случае, когда грунт нарушенных территорий мелкодисперсный, дополнительный вклад в распространение тонких частиц (в том числе, загрязнителей) вносит дефляция и эоловый перенос. Таким образом, нарушенные земли месторождений (как отработанных, так и разрабатываемых), безусловно, вносят свой вклад в загрязнение окружающей среды в пределах БПТ. Величина этого вклада зависит от нескольких факторов, в частности: площади нарушенных земель, характера антропогенной трансформации рельефа и состава поверхностных отложений на участке воздействия, «свежести» антропогенного рельефа (или стадии рекультивации), геоморфологической позиции месторождения и ассоциированных с ним нарушенных земель, типа добываемого полезного ископаемого.

Так, чем больше площадь нарушенных земель и меньше площадь рекультивированных участков, тем больше совокупная величина потенциального стока загрязняющих веществ. Большое значение имеет положение конкретного месторождения. К примеру, при положении нарушенных земель в бессточной котловине сток загрязняющих веществ оказывается локализован и не выходит за ее пределы. С другой стороны, при разработке месторождения в днище речной долины (характерно для россыпных месторождений) загрязняющие вещества имеют возможность мигрировать с речным стоком далеко за пределы района разработки. В то же время, интенсивность и дальность миграции во многом определяются характером изменения уклонов рек, наличием внутрибассейновых участков аккумуляции загрязняющих веществ (внутренних дельт, подпрудных водоемов и пр.). Так, установлено, что под влиянием обозначенных выше факторов вклад горнодобывающей промышленности г. Закаменска (бассейн р. Модон-Куль – правого притока р. Джиды, Бурятия) в поступление поллютантов в р. Джиду оказывается невелик, но, тем не менее, он все равно присутствует [34]. Тип разрабатываемого полезного ископаемого влияет, прежде всего, на состав загрязняющих веществ. Наиболее широкий спектр опасных загрязнителей характерен для районов разработки россыпей (золота, серебра и др.), а также участков добычи руд цветных металлов (вольфрам-молибденовые месторождения и пр.). Более узкий спектр характерен для районов разработки бурого и каменного угля, а наиболее узкий – общестроительных полезных ископаемых.

Следовательно, для комплексной оценки влияния трансформации рельефа в районах горнопромышленного освоения на экологическое состояние БПТ необходимо



Рис. 1. Добыча угля на Окинском месторождении (Бичурский район, Бурятия): амплитуда вертикального расчленения рельефа достигает 150–180 м.

Fig. 1. Coal mining at the Okinsky deposit (Bichursky district, Buryatia): the amplitude of the vertical dissection of the relief reaches 150–180 m.

оценить существующие разрабатываемые/отработанные/заброшенные месторождения с точки зрения обозначенных выше критериев. Предлагаемая методика комплексной оценки включает **следующие этапы**:

1. Выделение границ нарушенных земель (разрабатываемых и заброшенных месторождений) на основе анализа данных о контурах месторождений, предоставляемых на сайте Роснедр (<https://openmap.mineral.ru/>), результатов дешифрирования разновременных космических снимков и полевого обследования отдельных участков БПТ (выполнено авторами в июле 2022 г.).

2. Определение значимых свойств (критериев оценки) каждого контура нарушенных земель (площадь, геоморфологическая позиция, характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений на участке воздействия, стадия рекультивации, тип добываемого сырья).

3. Присвоение баллов каждому контуру (месторождению или его части) по каждому из значимых критериев оценки. В случае, если в пределах одного месторождения могут быть выделены участки, различающиеся по значению критериев, балл присваивался по наихудшей позиции.

4. Расчет интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности путем суммирования произведений баллов по каждому их критериев на коэффициент значимости соответствующего критерия. Для учета разной значимости критериев в комплексной оценке использован метод анализа иерархий [36–38].

5. Умножение полученного значения интегрального показателя опасности на площадь соответствующего участка нарушенных земель (месторождения или его части). В дальнейшем, к примеру, для перехода на уровень оценки по выбранным территориальным единицам (к примеру, муниципальным образованиям), возможно суммирование таких произведений по всем участкам нарушенных земель внутри отдельного выдела (в частности, в данной работе – внутри границ муниципального образования).

После анализа данных о локализации и статусе месторождений на сайте Роснедр (<https://openmap.mineral.ru/>) площади нарушенных земель в пределах БПТ по состоянию на 2020 г. были уточнены путем дешифрирования свободно распространяемых

многозональных спутниковых изображений высокого разрешения Sentinel-2A и Sentinel-2B. Выбор данной съемочной системы обусловлен сплошным покрытием территории съемкой, высоким пространственным разрешением снимков (10 м/пикс), а также относительно высокой повторяемостью съемки, позволяющей подобрать съемочные сцены, удовлетворяющие требованиям как по времени съемки, так и по условиям облачности, задымленности и пр. Снимки Sentinel-2 (на 2020 г.) были получены с интернет-портала scihub.copernicus.eu. Пространственное разрешение выбранных для дешифрирования съемочных систем позволяет уверенно дешифрировать участки нарушенных земель плановыми размерами более чем 15×15 м, что представляется вполне достаточным для целей исследования. Для дешифрирования подбирались съемочные сцены на конец лета – начало осени (завершающая часть активного вегетационного периода). Также обязательным условием выбора сцены было отсутствие, либо незначительная (не более 5%) площадь облачности, а также низкий уровень задымления (что весьма актуально в пожароопасный период). Для дешифрирования использовалась стандартная комбинация каналов видимой части спектра 4-3-2, позволяющая получить синтезированное изображение в естественных цветах. Все работы по созданию синтезированных изображений и их дешифрированию производились в среде свободно распространяемой геоинформационной системы QGIS.

В ходе работ использовались следующие основные дешифровочные признаки: отсутствие или разреженность растительности, характер очертаний объекта (скругленные очертания отвальных полей, иногда – прямоугольные очертания горных выработок и т.п.), наличие специфических текстур поверхности (бермы отвальных полей, ступени нагорных карьеров, обвалования хвостохранилищ и пр.), закономерное сочетание (чередование) участков разреженной или отсутствующей растительности с мелкими искусственными водоемами, ориентированными как вдоль, так и субперпендикулярно руслам рек (особенно характерно для участков разработки россыпных месторождений в днищах долин рек), наличие дорог внутри дешифрируемого контура. Эти признаки в комплексе с исходными данными с портала Роснедр позволяют достаточно уверенно определять контуры нарушенных земель. В качестве дополнительных источников данных использовались также снимки высокого и сверхвысокого разрешения коммерческих съемочных систем WorldView-1, WorldView-2 и др. за отдельные годы, имеющиеся в свободном доступе на публичных интернет-порталах Google.Maps, Yandex.Maps, Bing.Maps, а также в сервисе ArcGIS.Imagery. Эти снимки в силу исключительно высокого (до 1–2 м/пикс) разрешения позволяют практически однозначно удостовериться в том, что выделенный участок нарушенных земель связан именно с добычей полезных ископаемых и, тем самым, верифицировать данные, полученные на основе анализа снимков Sentinel.

Следующим этапом оценки стал выбор и ранжирование значимых критериев (в основном неколичественных), определяющих степень опасности воздействия нарушенных земель на экологическую ситуацию в регионе (табл. 1).

При присвоении баллов частным значениям (диапазоном) значимых критериев акцент делался на величине потенциальной и/или фактической опасности ситуации, когда критерий принимает то или иное значение (при этом чем выше балл, тем больше опасность). Далее с использованием программного аппарата QGIS частным контурам нарушенных земель присваивался балл по каждому из четырех критериев. Для получения итогового значения комплексного показателя геоморфологической опасности необходим взвешенный учет критериев, так как они, очевидно, отличаются степенью значимости и влияния на итоговый результат оценки.

Веса критериев были определены с использованием метода анализа иерархий [35–38], для чего с привлечением коллектива экспертов-геоморфологов (всего опрошено – 6 чел.) составлена матрица попарных сравнений значимости. Матрица заполнялась

Таблица 1. Критерии комплексной оценки эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных в результате разработки полезных ископаемых
Table 1. Criteria for a comprehensive assessment of the environmental and geomorphological risk on the lands affected by development of mineral resources

№	Критерий	Значение критерия	Балл
1	Геоморфологическая позиция участка месторождения	Плоские вершинные поверхности междуречий, днища замкнутых котловин, в том числе занятых озерами; площадки обширных озерных террас	1
		Приводораздельные позиции в условиях пересеченного рельефа, площадки надпойменных террас и поверхности подгорных шлейфов и педиментов	2
		Склоновые позиции, днища обширных межгорных котловин, дренируемые малыми водотоками	3
		Днища небольших долин постоянных и временных водотоков, пойменно-русловой комплекс долин рек	4
2	Характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений	Участки разведанных, но пока не разрабатываемых месторождений , где распространены комплексы мелких горных выработок (разведочные канавы и пр.); состав антропогенных отложений различен, а их объемы минимальны в сравнении с прочими типами. Для таких участков воздействия характерны небольшие амплитуды вертикального расчленения рельефа (до 10–15 м), фрагментарность воздействия (антропогенный рельеф характеризуется более скромными морфологическими параметрами) и в целом меньшая антропогенная трансформация естественных ландшафтов.	1
		Участки воздействия с комплексом форм рельефа, связанных с разработкой общестроительных полезных ископаемых : карьерами (в том числе пойменными и русловыми) и отвалами вскрышных пород; характерно преобладание техногенно-переотложенных отложений – рыхлого материала размерностью до щебня/галки	2
		Участки воздействия, где происходит разработка месторождений в коренных породах (рудные месторождения, угольные разрезы и пр.) , рельеф которых характеризуется максимальной (до первых сотен метров) вертикальной расчлененностью (карьеры (в том числе нагорные), отвалы различной морфологии, выемки и полувыемки, рвы обрушения), а в составе антропогенных отложений преобладает грубообломочный материал валунно-глыбовой размерности	3
		Участки, трансформированные освоением россыпных месторождений (золота, вольфрама и пр.), где наблюдается небольшая (первые десятки метров) амплитуда расчленения рельефа (сочетание карьеров-выемок и отвалов пустой породы), характерно преобладание в составе антропогенных отложений песчано-гравийно-галечного материала, относительно легковывлекаемого в перемещение вниз по долинам рек (включая поллютанты), а также участки обособленных хвостохранилищ горнообогатительных комбинатов (характерные амплитуды вертикального расчленения рельефа – первые десятки метров); в составе антропогенных отложений которых доминируют частицы алевроглинистой и тонкопесчаной размерности, высокая доля поллютантов, перемещающихся за пределы районов складирования отходов с водой и ветром	4
3	Стадия рекультивации	Разработка прекращена, участок практически полностью рекультивирован (более 75% площади), либо разработка не начата, имеются только разведочные горные выработки	1
		Разработка прекращена, рекультивировано 25–75% территории	2
		Разработка прекращена, рекультивировано менее 25% территории, либо разрабатывается и рекультивировано более 25% территории	3
		Разрабатывается, рекультивировано менее 25% площади	4
4	Тип добываемого сырья	Грунтовые строительные материалы (щебень, песок, песчано-гравийная смесь и пр.)	1
		Каменный и бурый угли	2
		Флюорит и другое нерудное сырье, извлекаемое из скальных пород, руды драгоценных металлов (золото, серебро и пр.)	3
		Руды цветных и черных металлов, россыпи драгоценных металлов (золото)	4

Таблица 2. Квалиметрические коэффициенты (веса) критериев, определенные методом анализа иерархий**Table 2.** Qualitemetric criteria ratios determined by the hierarchy analysis method

Критерий	Расчетный вес критериев
Геоморфологическая позиция участка месторождения	0.414
Характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений	0.122
Стадия рекультивации	0.198
Тип добываемого сырья	0.265

каждым из экспертов независимо от других, при этом выполнялось попарное сравнение значимости используемых критериев с использованием шкалы значимости по [36–38]. При проведении оценки значимости каждый критерий по очереди сравнивается со всеми остальными, значения показателя сравнительной значимости вносятся в матрицу. Итогом каждой экспертной оценки, таким образом, становится квадратная матрица A размером 4×4 (поскольку нами использовалось четыре критерия для оценки), все значения на главной диагонали которой равны 1, а для остальных элементов верно соотношение:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}},$$

где a_{ij} – элемент матрицы A , находящийся на пересечении i -й строки и j -го столбца.

Далее каждая из составленных экспертами матриц попарного сравнения тестировалась на согласованность суждений согласно стандартной процедуре, обычно используемой в рамках метода анализа иерархий (АНР-подход) [36]. Фактические значения критерия согласованности изменялось в диапазоне от 0.001 до 0.05, поэтому все полученные частные экспертные матрицы были задействованы в оценке. Далее матрицы суждений проходили процедуру нормировки [36], после чего рассчитывалось среднее значение элементов по каждой строке. Эти средние значения и принимаются в качестве весов критериев в рамках одного экспертного мнения. Последним этапом определения итоговых весов критериев является арифметическое осреднение частных экспертных оценок веса каждого из критериев. Результаты осреднения весов четырех выбранных критериев по частным экспертным оценкам приведены в табл. 2.

Финальным этапом комплексной оценки стал, собственно, расчет безразмерного интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель ($\Gamma_{\text{нз}}$) для каждого контура нарушенных земель (месторождения) по формуле:

$$\Gamma_{\text{нз}} = \sum_{i=1}^4 K_i w_i,$$

где – значение конкретного критерия (в баллах), w – его вес.

Значения интегрального показателя $\Gamma_{\text{нз}}$ могут изменяться в пределах от 1 до 4, при этом значение $\Gamma_{\text{нз}} = 4$ соответствует наиболее опасным участкам нарушенных земель (с точки зрения роли участка как источника загрязняющих веществ), а $\Gamma_{\text{нз}} = 1$ – наиболее безопасным участкам.

Поскольку ключевой задачей комплексной оценки эколого-геоморфологической опасности является установление возможного негативного влияния разных частей территории БПТ (к примеру, отдельных муниципальных образований) на окружающую природную среду и, в конечном счете, на состояние экосистем озера Байкал, ключевое значение имеют потенциальные абсолютные значения поступления загрязняющих веществ с нарушенных земель. Можно предположить, что они будут прямо

пропорциональны площадям отдельных участков нарушенных земель и значению показателя их геоморфологической опасности, рассчитанного по указанной выше формуле. К примеру, крупный по площади участок с высоким значением показателя потенциально будет являться источником большего количества загрязняющих веществ, чем более мелкий по площади участок с таким же значением комплексного показателя. Соответственно, в качестве агрегированной меры потенциального воздействия земель, нарушенных при горнопромышленном освоении, на окружающую природную среду для отдельных участков нарушенных земель было использовано произведение площади данного участка нарушенных земель (в м²) на показатель его геоморфологической опасности. В дальнейшем полученные значения показателя для отдельных участков месторождений могут быть агрегированы для получения комплексной характеристики любых территориальных выделов, к примеру, речных бассейнов или административных районов. В рамках настоящей статьи приведен пример применения методики, где агрегация значений выполнена для муниципальных образований БПТ. Получаемое значение интегрального показателя может рассматриваться как характеристика совокупной эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных при горнопромышленном освоении, в границах данного муниципального образования. Такого рода оценка может быть использована при принятии административных решений по снижению опасности воздействия горнодобывающей промышленности на экологическую обстановку.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фактически полученные расчетным путем значения комплексного показателя эколого-геоморфологической опасности для отдельных участков нарушенных земель БПТ изменялись в диапазоне от 1.121 до 3.396. Для удобства представления на картах диапазон значений интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности был разбит на четыре класса, соответствующие низкой (1.00–1.75), средней (1.75–2.50), высокой (2.50–3.25) и очень высокой (3.25–4.00) степени опасности (рис. 2).

Диапазон расчетных значений интегрального показателя потенциальной эколого-геоморфологической опасности земель, нарушенных при горнопромышленном освоении (отображено качественным фоном на рис. 2), получился достаточно широким – от 2001 до 70870046 (внутри каждого муниципального образования суммировались произведения площади участка нарушенных земель на полученное для этого участка значение интегрального показателя). Для удобства представления на карте (рис. 2) весь диапазон значений итогового показателя (агрегированного внутри каждого муниципального образования) разделен на шесть промежутков. Отдельно показаны (зеленым цветом на рис. 2) муниципальные образования, в пределах которых нарушенные земли за рассматриваемый период времени (2014–2020 гг.) не выявлены (Тункинский, Муйский, Курумканский, Баунтовский эвенкийский районы и Северобайкальский городской округ Бурятии, Ольхонский район и Иркутский городской округ Иркутской области, а также Читинский район Забайкальского края).

Анализируя рейтинг регионов по значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель (Гнз) можно выделить группу муниципальных образований, лидирующих по значению показателя по состоянию на 2020 г. (рис. 3).

Наибольшее значение показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель по состоянию на 2020 г. характерно для Красночикийского района Забайкальского края, что объясняется широким распространением нарушенных земель в районах россыпной добычи золота. Днища речных долин, в пределах которых происходит разработка россыпных месторождений, полностью трансформированы человеком – создан комплекс антропогенных форм (насыпи, выемки, отвалы, плотины

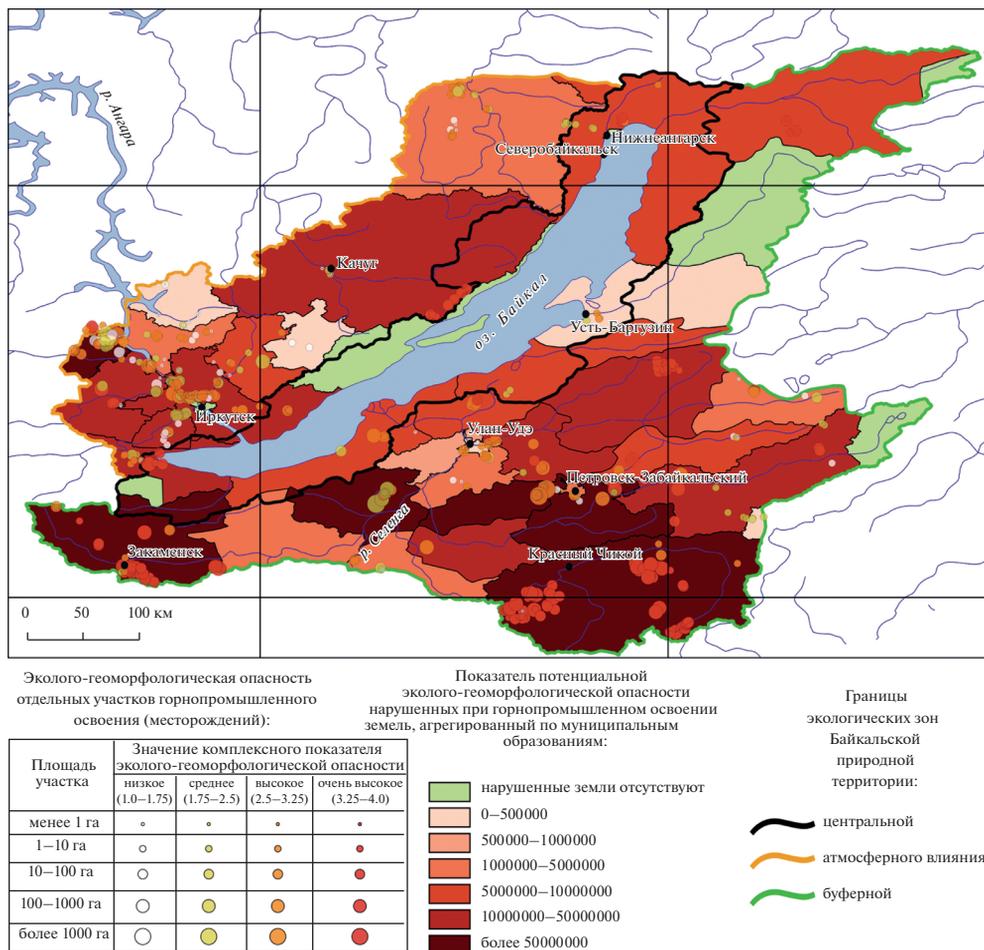
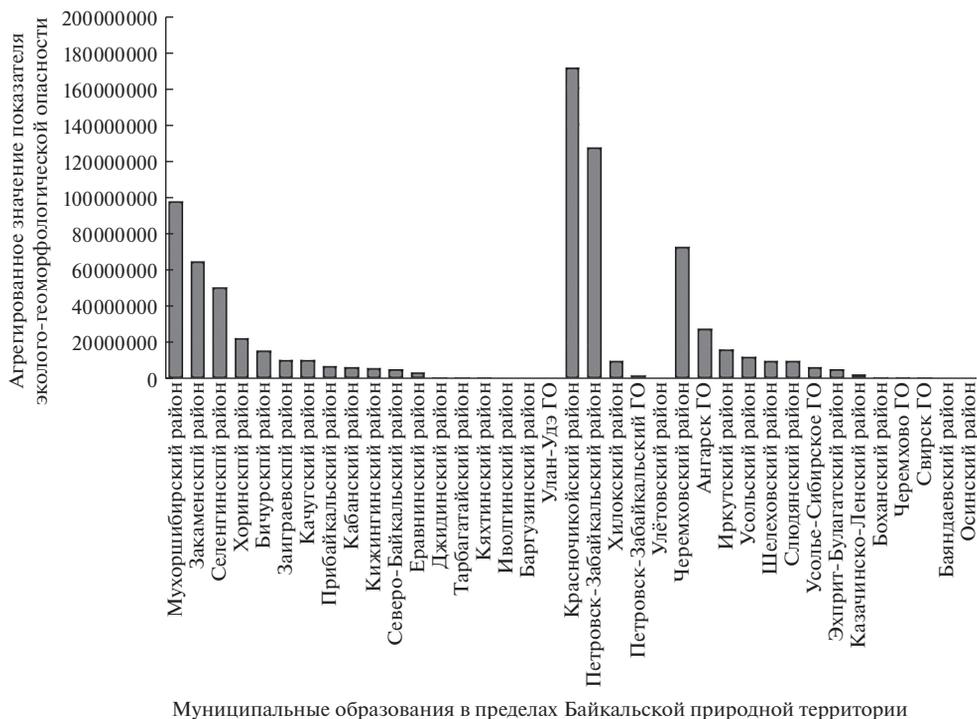


Рис. 2. Эколого-геоморфологическая опасность потенциального воздействия земель, нарушенных при добыче полезных ископаемых, на экологическое состояние Байкальской природной территории (по состоянию на 2020 год).

Fig. 2. Potential ecologo-geomorphological hazard of mining for the ecological state of the Baikal Natural Territory (as of 2020).

и пр.), естественная растительность нарушена и на отработанных участках восстанавливается крайне медленно. С поверхности в пределах нарушенных земель залегают легко размываемые песчаные грунты, содержащие широкий спектр загрязнителей, в том числе, особо опасные вещества (ртуть, углеводороды и пр.). Естественные лесные ландшафты на таких территориях соседствуют с техногенными “пустынями”, где под действием воды и ветра загрязнители мигрируют и с речным стоком способны распространяться далеко за пределы районов разработки месторождений.

Второе место по величине интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель занимает Петровск-Забайкальский район Забайкальского края, где расположены активно разрабатываемые угольные разрезы Саган-Нур,



Муниципальные образования в пределах Байкальской природной территории

Рис. 3. Рейтинг муниципальных образований по агрегированному в их границах значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель $\Gamma_{\text{нз}}$ (по состоянию на 2020 г.).

Fig. 3. Rating of municipalities according to the complex index of eco-geomorphological hazard of disturbed lands (as of 2020).

Зугмара и Харауз, а также Бом-Горхонское месторождение вольфрама и висмута. Третье место в рейтинге и лидирующую позицию среди муниципальных образований Бурятии занимает Мухоршибирский район, где продолжается разработка угольных месторождений Саган-Нур и Харауз. Закаменский район Бурятии, занимающий в пределах Бурятии третье место по площади нарушенных земель, по показателю геоморфологической опасности выходит на второе место в пределах субъекта (и пятое в пределах БПТ). Это связано с благоприятным для транспорта поллютантов геоморфологическим положением разрабатываемых месторождений (в днищах и на склонах речных долин, а также в приводораздельных позициях) и их высокой опасностью (тяжелые металлы, кислоты, ртуть). Кроме того, в Закаменском районе разрабатываются Инкурское и Холтосонское месторождения вольфрама (в верховьях р. Джиды) и многочисленны частично заброшенные, но не рекультивированные россыпные месторождения золота в долинах правых притоков Джиды ниже Закаменска. Среди муниципальных образований Иркутской области по показателю эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель лидирует Черемховский район, где расположено одно из крупнейших месторождений каменного угля, он же занимает четвертое место в общем рейтинге в пределах всей БПТ по состоянию на 2020 год.

ВЫВОДЫ

Анализируя полученные результаты комплексной оценки эколого-геоморфологической опасности нарушенных при разработке полезных ископаемых земель в пределах муниципальных образований Иркутской области, Бурятии и Забайкальского края, входящих в границы БПТ, можно сделать следующие основные выводы:

1. Расчет интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель позволяет более детально охарактеризовать последствия разработки месторождений для экологической ситуации в регионе, так как учитывает не только площадь нарушенных земель, но и другие факторы, влияющие на возможность транспорта вещества и степень его экологической опасности (в частности, тип добываемого сырья, геоморфологическую позицию разрабатываемых месторождений, степень антропогенной трансформации рельефа, состав антропогенных отложений и степень рекультивации нарушенных земель).

2. Лидирующие позиции по значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель занимают муниципальные образования, где продолжаются ширококомасштабная добыча каменного угля (Мухоршибирский район Бурятии, Петровск-Забайкальский район Забайкальского края), руд цветных металлов (Закаменский район Бурятии, Петровск-Забайкальский район Забайкальского края) и разработка россыпных месторождений золота (Закаменский район Бурятии, Красночикоийский район Забайкальского края).

3. Абсолютным лидером по площади нарушенных земель по состоянию на 2020 год в пределах БПТ является Петровск-Забайкальский район Забайкальского края (4395 га), по значению интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель по состоянию на 2020 г. лидирует Красночикоийский район Забайкальского края ($\Gamma_{\text{нз}} = 171565725$). Такая смена района-лидера связана с типом добываемого сырья и геоморфологической позицией разрабатываемых месторождений в Красночикоийском районе – преобладают россыпные месторождения, характеризующиеся наличием особо опасных веществ (ртути, используемой при выделении полезного компонента), а также расположением в днищах долин, что благоприятно для выноса вещества (в т.ч. поллютантов) за пределы участков добычи сырья.

4. В ряде муниципальных образований Иркутской области, Бурятии и Забайкальского края значения интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель крайне низкие или вообще равны нулю (в случае отсутствия нарушенных земель по состоянию на 2020 гг.). К примеру, в пределах Бурятии значения интегрального показателя эколого-геоморфологической опасности нарушенных земель, полученные для Кяхтинского, Иволгинского, Баргузинского районов и городского округа Улан-Удэ, примерно в сто раз меньше, чем полученные для Мухоршибирского района.

Исследования выполнены в рамках договора № 8/Д-2021 “Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал” (руководитель – д.г.н., профессор, академик РАН Н.С. Касимов) и темы госзадания кафедры геоморфологии и палеогеографии № 121040100323-5 “Эволюция природной среды в кайнозой, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абалаков А.Д., Базарова Н.Б.* Картографическая оценка воздействия горнодобывающей промышленности на окружающую среду в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 64–73.
2. *Абалаков А.Д., Базарова Н.Б.* Экологические аспекты горнодобывающего производства районов экономического коридора Китай–Монголия–Россия // География и природные ресурсы. 2020. № 2. С. 42–50.

3. *Абрамов Б.Н., Эпова Э.С., Манзырев Д.В.* Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в Восточном Забайкалье // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 103–111.
4. Атлас Байкальский регион: общество и природа. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения РАН, 2021. 320 с. ISBN 978-5-98797-313-4.
5. *Бабурин В.Л., Бадина С.В., Деркачева А.А., Сократов С.А., Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л.* Оценка селевого риска в экономических показателях на примере Сибирского федерального округа // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 4. С. 3–14.
6. *Баженова О.И., Тюменцева Е.М., Тухта С.А.* Экстремальные фазы денудации и вопросы геоморфологической безопасности Верхнего Приангарья // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 118–129.
7. *Белоцерковский М.Ю., Белякова Т.М., Беркович К.М., Гладкевич Г.И., Губанов М.Н., Зорина Е.Ф., Косарев А.Н., Ларионов Г.А., Семенченко Б.А., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экологическая напряженность России (факторы, их оценка и районирование) / Проблемы оценки экологической напряженности территории России: факторы, районирование. М.: Изд-во МГУ. 1993. С. 93–100.
8. *Битюкова В.Р.* Интегральная оценка экологической ситуации городов России // Региональные исследования. 2014. № 4. С. 49–57.
9. *Битюкова В.Р., Боровиков М.С.* Экологическое состояние регионов России и Казахстана: возможности измерения и факторы дифференциации // Региональные исследования. 2016. № 4 (54). С. 67–80.
10. *Бычков О.А.* Прогнозная оценка состояния геотехнических систем при освоении территорий / Кучинские чтения: материалы юбилейной научной конференции, посвященной 120-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Томск: Изд-во ТГАСУ. 2007. С. 78–80.
11. *Бычков О.А., Мухина Е.М.* Методика оценки изменения состояния окружающей среды при освоении территорий Ишидеевского и Хандинского месторождений Иркутского угольного бассейна / Роговские чтения. Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий (Матер. Всерос. Конф.). Томск. 2015. С. 99–101.
12. *Владимиров И.Н., Корытный Л.М., Плюсин В.М., Сороковой А.А.* Исследования Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН на Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2016. № 55. С. 6–14.
13. *Владимиров И.Н.* Природная сущность и социальная значимость экологического потенциала геосистем // География и природные ресурсы. 2019. № 55. С. 12–18.
14. *Владимиров И.Н.* Экологический потенциал геосистем Байкальской Сибири как основа оптимизации природопользования в регионе // География и природные ресурсы. 2020. Т. 41. № 55. С. 6–13.
15. *Владимиров И.Н.* Экологический потенциал экосистем Байкальской Сибири. Диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Иркутск, 2020. 409 с.
16. *Выркин В.Б., Плюсин В.М., Белозерцева И.А., Шеховцов А.И., Енущенко И.В., Захаров В.В.* Современное состояние природы и экологические проблемы Среднего Приангарья // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 25–35.
17. *Грязнова В.В., Данилина А.В., Деркачева А.А., Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л.* Риск землетрясений на территории России в экономических показателях // Снежные лавины, сели и оценка риска. 2020. Вып. 4. С. 100–116.
18. *Еременко Е.А., Беляев Ю.Р., Большов С.И., Мысливец В.И., Бредихин А.В.* Новый подход к комплексной оценке рельефа для целей эффективного природопользования // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 1. С. 19–32.
19. *Качура Р.А., Куклин А.С., Лапердин В.К., Тимофеев Н.В.* Геологические опасности и риски по нефтегазопроводам на севере о. Сахалин // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2009. Т. 2. № 1. С. 59–74.
20. *Кондрин А.Т., Косарев А.Н., Полякова А.В., Полякова Т.В.* Экологическое состояние и устойчивость к антропогенным нагрузкам морей Европейской части России / Проблемы оценки экологической напряженности Европейской территории России: факторы, районирование, последствия. М. 1996. С. 107–117.
21. *Коновалова Т.И.* Методология исследования трансформации геосистем геотектонически активных регионов // География и природные ресурсы. 2020. Т. 41. № 55. С. 14–19.
22. *Косинова И.И., Крутских Н.В.* Эколого-геологическое районирование территории г. Воронежа // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Геология. 2001. № 12. С. 205–212.
23. *Крашенинникова С.В.* К вопросу об эколого-геоморфологической оценке территории города // Изв. ПГПУ. Естественные науки. 2006. № 1 (5). С. 150–154.
24. *Кружалин В.И.* Эколого-геоморфологический анализ территории // Вестник МГУ. Сер. 5. Геогр. 1997. № 4. С. 11–15.
25. *Кузьмин С.Б.* Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск: Акад. изд-во "Гео", 2009. 195 с.
26. *Кузьмин М.И., Кузнецова А.Н.* Эколого-геологические риски развития ресурсных регионов // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 5–13.
27. *Лапердин В.К., Кустов Ю.И., Качура Р.А.* Факторы природной нестабильности и техногенных рисков на территории курорта Аршан (бассейн р. Кынгари, республика Бурятия) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 4. С. 37–45.

28. Лебедева Е.В., Шварев С.В., Готванский В.И. Природно-обусловленная напряженность геоморфологических процессов территории Дальнего Востока России // Геоморфология. № 4. 2014. С. 48–59.
29. Лопаткин Д.А. Картографирование экологической сбалансированности территории (на примере Байкальского региона) // География и природные ресурсы. 2020. Т. 41. № 5. С. 208–213.
30. Подосенова О., Сливяк В. Уголь России: влияние на окружающую среду и человека. 2013. 19 с.
31. Фролов А.А. Геоинформационное картографирование изменчивости ландшафтов (на примере Южного Прибайкалья) // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 156–166.
32. Фролов А.А., Силаев А.В., Софронов А.П. Геосистемы хребта Малый Хамар-Дабан (западное Забайкалье) // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 1. С. 73–83.
33. Шныпарков А.Л., Турчанинова А.С., Хисматуллин Т.И., Сократов С.А. Селевой риск для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции. Душанбе: ООО Промоушн. 2020. Т. 1. С. 60–73.
34. Goncharov A.V., Baturina N.S., Maryinsky V.V., Kaus A.K., Chalov S.R. Ecological assessment of the Selenga River basin, the main tributary of Lake Baikal, using aquatic macroinvertebrate communities as bioindicators // Journal of Great Lakes Research. 2020. V. 46. № 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.11.005>
35. Alonso H.A., Lamata M.T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 2006. V. 14. № 4. P. 445–459.
36. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. McGraw-Hill, New York. 1980. 287 p.
37. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // European Journal of Operational Research. 1990. V. 48. Iss. 1. P. 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
38. Saaty T. Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The Analytic Hierarchy/Network Process // Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. 2008. V. 102 (2). P. 251–318.

Integrated Assessment of the Geomorphological Hazard of the Mining Territories within the Baikal Region

E. A. Eremenko^{1, *}, Yu. R. Belyaev^{1, **}, S. I. Bolysov^{1, *},
A. V. Bredikhin^{1, ****}, and V. R. Bituykova^{1, *****}**

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

*E-mail: eremenkoeaig@gmail.com

**E-mail: yrbel@mail.ru

***E-mail: sibol1954@bk.ru

****E-mail: avbredikhin@yandex.ru

*****E-mail: bituykova@yandex.ru

Abstract—A method for calculating the complex index of the eco-geomorphological hazard of mining territories according to their influence on the ecological situation in the Baikal region is proposed. The described approach makes it possible to characterize in detail the consequences of mining for the ecological situation in the region. The proposed assessment takes into account not only the area of disturbed lands, but also other factors affecting the possibility of transport of pollutants and the degree of their hazard (in particular, the type of raw material extracted, the geomorphological position of the mining territories, the degree of the anthropogenic transformation of landscapes, the composition of anthropogenic deposits and the degree of reclamation of disturbed lands). To test the methodology, the complex index of the eco-geomorphological hazard of lands disturbed by mining was calculated for municipalities of the Baikal region for 2020. Municipalities were ranked according to the value of the complex index and a corresponding map was compiled.

Keywords: complex index, anthropogenic relief, coal mining, alluvial gold mining, anthropogenic impact

REFERENCES

1. Abalakov A.D., Bazarova N.B. Kartograficheskaya ocenka vozdeystviya gornodobyvayushchej promyshlennosti na okruzhayushchuyu sredu v bassejne ozera Bajkal // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2015. № 3. S. 64–73.
2. Abalakov A.D., Bazarova N.B. Ekologicheskie aspekty gornodobyvayushchego proizvodstva rajonov ekonomicheskogo koridora Kitaj-Mongoliya-Rossiya // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2020. № 2. S. 42–50.
3. Abramov B.N., Epova E.S., Manzyrev D.V. Geoekologicheskie problemy otrabotki rudnykh mestorozhdenij zolota v Vostochnom Zabajkal'e // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2019. № 2. S. 103–111.
4. Atlas Bajkal'skij region: obshchestvo i priroda. Irkutsk: Institut geografii im. V.B. Sochavy Sibirskogo otdeleniya RAN, 2021. 320 s. ISBN 978-5-98797-313-4.
5. Baburin V.L., Badina S.V., Derkacheva A.A., Sokratov S.A., Hismatullin T.I., Shnyarkov A.L. Ocenka selevogo riska v ekonomicheskikh pokazatelyah na primere Sibirskogo federal'nogo okruga // *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* 2019. № 4. S. 3–14.
6. Bazhenova O.I., Tyumenceva E.M., Tuhta S.A. Ekstremal'nye fazy denudacii i voprosy geomorfologicheskoy bezopasnosti Verhnego Priangar'ya // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016. № 3. S. 118–129.
7. Belocerkovskij M.YU., Belyakova T.M., Berkovich K.M., Gladkevich G.I., Gubanov M.N., Zorina E.F., Kosarev A.N., Larionov G.A., Semenchenko B.A., Chalov R.S., Chernov A.V. Ekologicheskaya napryazhennost' Rossii (faktory, ih ocenka i rajonirovanie) / *Problemy ocenki ekologicheskoy napryazhennosti territorii Rossii: faktory, rajonirovanie*. M.: Izd-vo MGU. 1993. S. 93–100.
8. Bitjukova V.R. Integral'naya ocenka ekologicheskoy situacii gorodov Rossii // *Regional'nye issledovaniya*. 2014. № 4. S. 49–57.
9. Bitjukova V.R., Borovikov M.S. Ekologicheskoe sostoyanie regionov Rossii i Kaahstana: vozmozhnosti izmereniya i faktory differenciacii // *Regional'nye issledovaniya*. 2016. № 4 (54). S. 67–80.
10. Bychkov O.A. Prognoznaya ocenka sostoyaniya geotekhnicheskikh sistem pri osvoenii territorij / *Kuchinskije chteniya: materialy yubilejnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina*. Tomsk: Izd-vo TGASU. 2007. S. 78–80.
11. Bychkov O.A., Muhina E.M. Metodika ocenki izmeneniya sostoyaniya okruzhayushchej sredy pri osvoenii territorij Ishidejskogo i Handinskogo mestorozhdenij Irkutskogo ugol'nogo bassejna / *Rogovskie chteniya. Problemy inzhenernoj geologii, gidrogeologii i geoekologii urbanizirovannyh territorij (Mater. Vseross. Konf.)*. Tomsk. 2015. S. 99–101.
12. Vladimirov I.N., Korytnyj L.M., Plyusnin V.M., Sorokovoj A.A. Issledovaniya Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN na Bajkal'skoj prirodnoj territorii // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016. № 55. S. 6–14.
13. Vladimirov I.N. Prirodnaya sushchnost' i social'naya znachimost' ekologicheskogo potenciala geosistem // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2019. № 55. S. 12–18.
14. Vladimirov I.N. Ekologicheskij potencial geosistem Bajkal'skoj Sibiri kak osnova optimizacii prirodopol'zovaniya v regione // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2020. T. 41. № 55. S. 6–13.
15. Vladimirov I.N. Ekologicheskij potencial ekosistem Bajkal'skoj Sibiri. Dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora geograficheskikh nauk. Irkutsk, 2020. 409 s.
16. Vyrkin V.B., Plyusnin V.M., Belozerceva I.A., Shekhovcov A.I., Enushchenko I.V., Zaharov V.V. Sovremennoe sostoyanie prirody i ekologicheskie problemy Srednego Prionon'ya // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2014. № 1. S. 25–35.
17. Gryaznova V.V., Danilina A.V., Derkacheva A.A., Hismatullin T.I., Shnyarkov A.L. Risk zemletrясenij na territorii Rossii v ekonomicheskikh pokazatelyah // *Snezhnye laviny, seli i ocenka riska*. 2020. Vyp. 4. S. 100–116.
18. Eremenko E.A., Belyaev Y.R., Bolysov S.I., Myslivec V.I., Bredikhin A.V. Novyj podhod k kompleksnoj ocenke rel'efa dlya celej effektivnogo prirodopol'zovaniya // *Geomorfologiya*. 2021. T. 52. № 1. S. 19–32.
19. Kachura R.A., Kuklin A.S., Laperdin V.K., Timofeev N.V. Geologicheskie opasnosti i riski po neftegazoprovodam na severe o. Sahalin // *Izvestiya Irkutskogo gos. un-ta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2009. T. 2. № 1. S. 59–74.
20. Kondrin A.T., Kosarev A.N., Polyakova A.V., Polyakova T.V. Ekologicheskoe sostoyanie i ustojchivost' k antropogennym nagruzkam morej Evropejskoj chasti Rossii / *Problemy ocenki ekologicheskoy napryazhennosti Evropejskoj territorii Rossii: faktory, rajonirovanie, posledstviya*. Moskva, 1996. S. 107–117.
21. Konovalova T.I. Metodologiya issledovaniya transformacii geosistem geotektonicheski aktivnyh regionov // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2020. T. 41. № 55. S. 14–19.
22. Kosinova I.I., Krutskih N.V. Ekologo-geologicheskoe rajonirovanie territorii g. Voronezha // *Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Geologiya*. 2001. № 12. S. 205–212.
23. Krashenninnikova S.V. K voprosu ob ekologo-geomorfologicheskoy ocenke territorii goroda // *Izvestiya PGPU. Estestvennye nauki*. 2006. № 1 (5). S. 150–154.
24. Kruzhalin V.I. Ekologo-geomorfologicheskij analiz territorii // *Vestnik MGU. Ser. 5. Geogr.* 1997. № 4. S. 11–15.

25. Kuz'min S.B. Opasnye geomorfologicheskie processy i risk prirodopol'zovaniya. Novosibirsk: Akad. izd-vo "Geo", 2009. 195 s.
26. Kuz'min M.I., Kuznecova A.N. Ekologo-geologicheskie riski razvitiya resursnyh regionov // Geografiya i prirodnye resursy. 2018. № 2. S. 5–13.
27. Laperdin V.K., Kustov Yu.I., Kachura R.A. Faktory prirodnoj nestabil'nosti i tekhnogennyh riskov na territorii kurorta Arshan (bassejn r. Kyngari, respublika Buryatiya) // Zashchita okruzhayushchej srede v neftegazovom komplekse. 2010. № 4. S. 37–45.
28. Lebedeva E.V., Shvarev S.V., Gotvanskij V.I. Prirodno-obuslovlennaya napryazhennost' geomorfologicheskikh processov territorii Dal'nego Vostoka Rossii // Geomorfologiya. № 4. 2014. S. 48–59.
29. Lopatkin D.A. Kartografirovaniye ekologicheskoy sbalansirovannosti territorii (na primere Bajkal'skogo regiona) // Geografiya i prirodnye resursy. 2020. T. 41. № S5. S. 208–213.
30. Podosenova O., Sliviyak V. Ugol' Rossii: vliyaniye na okruzhayushchuyu sredyu i cheloveka. 2013. 19 s.
31. Frolov A.A. Geoinformacionnoye kartografirovaniye izmenchivosti landshaftov (na primere YUzhnogo Pribajkal'ya) // Geografiya i prirodnye resursy. 2015. № 1. S. 156–166.
32. Frolov A.A., Silaev A.V., Sofronov A.P. Geosistemy hrebta Malyj Hamar-Daban (zapadnoye Zabajkal'e) // Geografiya i prirodnye resursy. 2021. T. 42. № 1. S. 73–83.
33. Shnyparkov A.L., Turchaninova A.S., Hismatullin T.I., Sokratov S.A. Selevoj risk dlya transportnyh kommunikacij territorii Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka v seredine XXI veka // Seleveye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii. Dushanbe: OOO Promoushn. 2020. T. 1. S. 60–73.
34. Goncharov A.V., Baturina N.S., Maryinsky V.V., Kaus A.K., Chalov S.R. Ecological assessment of the Selenga River basin, the main tributary of Lake Baikal, using aquatic macroinvertebrate communities as bioindicators // Journal of Great Lakes Research. 2020. V. 46. № 1. P. 53–61. DOI: 10.1016/j.jglr.2019.11.005
35. Alonso H.A., Lamata M.T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 2006. Vol. 14. № 4. P. 445–459.
36. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. McGraw-Hill, New York. 1980. 287 p.
37. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // European Journal of Operational Research. 1990. Vol. 48. Iss. 1. P. 9–26. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
38. Saaty T. Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The Analytic Hierarchy/Network Process // Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. 2008. Vol. 102 (2). S. 251–318.