

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.03: 504.75 (282.256.341)

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В МУНИЦИПАЛИТЕТАХ
БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ И ЕГО РОЛЬ
В ПОСТУПЛЕНИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С РЕЧНЫМ СТОКОМ
В ОЗЕРО БАЙКАЛ

© 2025 г. В. Р. Битюкова^{1, *}, С. Р. Чалов^{1, **}, Е. В. Антонов^{1, 2, ***}, Ю. Р. Беляев^{1, ****},
С. И. Болысов^{1, *****}, А. В. Бредихин^{1, *****}, В. Ю. Григорьев^{1, *****},
О. Е. Прусихин^{1, *****}, М. Ю. Лычагин^{1, *****}, А. С. Цыпленков^{1, *****}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

**e-mail: hydroserg@mail.ru

***e-mail: antonovmtg@inbox.ru

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

*****e-mail: sibol@mail.ru

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

*****e-mail: vadim308g@mail.ru

*****e-mail: olegprus2000@mail.ru

*****e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

*****e-mail: atsyplenkov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2024 г.

После доработки 11.03.2025 г.

Принята к публикации 31.03.2025 г.

Несоответствие границ речных бассейнов, в пределах которых происходит перенос загрязняющих веществ водными потоками, и административных (муниципальных) округов, где размещены источники их поступления в реки, является сложной научно-методической проблемой управления водными ресурсами. В статье приводится интегральная оценка антропогенного воздействия, рассчитанного по материалам государственной статистики в разрезе муниципалитетов Байкальской природной территории, и на примере речных бассейнов – притоков Байкала, расположенных в ее пределах, обсуждается предложенная авторами методика оценки вклада муниципалитетов в поступление тяжелых металлов и металлоидов (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mo, P, Sb, Sn, U) в растворенной и взвешенной форме с речным стоком в оз. Байкал. Методами регрессионного анализа определена ведущая роль 5 факторов воздействия, статистически оказывающих влияние на формирование концентраций и потоков приоритетных загрязнителей в замыкающих створах 13 крупнейших притоков Байкала (рр. Селенга, Баргузин, Турка, Тья, Верхняя Ангара, Снежная, Кичера, Голоустная, Бугульдейка, Утулик, Кика, Фролиха, Большая Черемшана). К ним относятся: объем сброса сточных вод; объем сброса неочищенных сточных вод; площади, нарушенные горнодобывающей деятельностью; геоморфологическая опасность территории; темпы потенциальной эрозии почв. Учет вклада отдельных муниципалитетов, расположенных в пределах речных бассейнов, в формирование суммарного воздействия по каждому из пяти факторов позволил обосновать метод определения количественной роли муниципалитетов в формировании потока загрязняющих веществ в Байкал. В границах Байкальской природной территории уровень антропогенного воздействия по большинству показателей имеет слабую тенденцию к снижению при увеличении локализации загрязнения в трех городских агломерациях (от 10 до 30% по каждому из веществ в городском округе Улан-Удэ, Северобайкальском и Селенгинском районах). Для этой зоны характерна наибольшая нагрузка сточных вод относительно объема поверхностных вод.

Ключевые слова: загрязнение, речной сток, антропогенное воздействие, бассейновый подход, муниципальные образования, Байкальская природная территория

DOI: 10.7868/S2658697525030096

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Байкал — уникальный природный объект, включенный в список всемирного природного наследия ЮНЕСКО, что подразумевает самый высокий из природоохранных статус. В то же время сочетание водных и лесных ресурсов, запасов угля и цветных металлов стало фактором развития многоотраслевого хозяйственного комплекса Прибайкальских территорий. Использование гидроэнергетического потенциала привело к тому, что сегодня Байкал выполняет роль “природного водохранилища”. Вблизи озера в советские годы был сформирован Иркутско-Черемховский территориально-производственный комплекс, специализирующийся на цветной металлургии, химии, лесной и деревообрабатывающей промышленности. Хотя сточные воды предприятий Приангарья и не попадают в Байкал, этот промышленный район связан с Байкалом атмосферным переносом загрязнений, приводящим к загрязнению снега на водосборах.

Для защиты озера от антропогенного воздействия (АВ) в соответствии с Федеральным законом была выделена Байкальская природная территория (БПТ), в состав которой входят само оз. Байкал, прилегающая к нему центральная экологическая зона (ЦЭЗ), его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, а также зона атмосферного загрязнения на западном берегу озера¹. БПТ — сложная природно-социально-экономическая система, сформированная антропогенными и естественно-природными компонентами, анализ которых служит основой для изучения ее экологических свойств. Особый статус БПТ обусловил закрытие источников и ликвидацию накопленного вреда наиболее мощных источников воздействия: в 2013 г. закрыт Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (однако накопленные за годы его работы запасы отходов, в частности, шлам-лигнина, размещенные на площадке комбината на побережье озера, пока еще не ликвидированы), с 1990 г. Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат прекратил сброс в р. Селенгу промышленных сточных вод.

Унаследованная территориально-планировочная структура БПТ сформировалась в основном в индустриальный период, когда промышленные объекты размещались без учета экологических требований. Осями промышленного развития территории стали Транссиб и БАМ. Новый этап хозяйственного освоения связан с развитием добывающей промышленности, строительством магистрального газопровода и второй ветки

БАМа, активным освоением туристско-рекреационных ресурсов Байкальского региона.

Степень зависимости загрязнения природной среды от изменения уровня АВ дает информацию о том, превышена ли экологическая емкость на конкретном участке территории или акватории. Сопряженный анализ уровня АВ, с одной стороны, и нарушенности природного комплекса — с другой, может выявить территории с наибольшим уровнем экологической напряженности и предложить систему мер, направленную либо на снижение АВ, либо на расширение экологической емкости (Бакуменко и др., 2014; Birkmann, 2007; The Green ..., 2022). Такой подход был использован для выявления факторов загрязнения атмосферы городов России (Vityukova et al., 2010), но для поверхностных вод методика сопряженной оценки значительно сложнее, поскольку предполагает включение не только источников АВ в непосредственной близости, но и в пределах водосборной площади (Дмитриев, 2009; Villa and McLeod, 2002).

Уровень *антропогенного воздействия* на поверхностные и подземные воды определяется сложным комплексом факторов, часть из которых поддается статистической оценке в рамках государственной отчетности предприятий: объем *забора воды* из поверхностных вод на нужды промышленности, ЖКХ и аграрного комплекса и *сброса сточных вод*, осуществляемого в водные объекты и закачку в скважины². В связи с тем, что загрязняющие вещества, переносимые со сточными водами, поступают непосредственно в реки, этот тип воздействия принято называть прямым. Косвенное влияние на перенос загрязняющих веществ оказывает изменение ландшафтов, в частности в результате обработки месторождений полезных ископаемых, приводящих к формированию комплексов антропогенного рельефа (карьеры, прорези, штольни, канавы, отвальные поля, терриконы, площадки хвостохранилищ, золоотвалы и пр.). Масштаб воздействия измеряется площадью нарушенных земель в процессе добычи, развития сопутствующих явлений и процессов, объемом образовавшихся отходов (Еременко и др., 2021), а токсичность — структурой отходов по классам опасности, наличием опасных веществ. Объем отходов является ведущим показателем, поскольку из 140 млн т отходов, образующихся в границах БПТ, вскрышные породы V класса опасности составляют 99.6%, а отходы I класса — 0.0001% (Разработка ..., 2022). Грунт, слагающий эти новообразованные формы рельефа, чаще всего слабо закреплен растительностью. Загрязняющие вещества из отвалов карьеров, золоот-

¹ Федеральный закон от 01.05.1999 № 94-ФЗ (ред. от 30.12.2021) “Об охране озера Байкал”.

² Сброс сточных вод “на рельеф” запрещен с 1 января 2016 г.

валов и хвостохранилищ имеют возможность поступать в речную сеть с поверхностным стоком (Лебедева и др., 2014, 2015). Это приводит к увеличению концентраций и потоков загрязняющих веществ по мере роста нарушенности земель, что регистрировалось, в том числе для участков добычи россыпей в бассейне р. Селенги (Чалов и др., 2015; Jarsjo et al., 2017). Аналогичное воздействие аграрного комплекса косвенно влияет на потоки загрязняющих веществ в реках через площадные характеристики нарушенных земель, соответствующие большому смыву с полей. В результате традиционным подходом к анализу качества воды и химического стока являются эмпирические соотношения между их характеристиками и факторами, определяющими как прямое воздействие — сброс загрязненных сточных вод, так и косвенное — нарушенность земель, в том числе накопленного вреда, способствующего увеличению поверхностного смыва и др. (Зиновьева, 2011; Караушев, 1977; Eguza et al., 2019; и др.).

Целью данной статьи является количественная оценка влияния хозяйственной деятельности в границах муниципальных образований БПТ на поступление тяжелых металлов и металлоидов в оз. Байкал со стоком крупнейших притоков. В основу работы положено сопоставление данных о переносе загрязняющих веществ (ЗВ) в замыкающих створах 13 крупнейших притоков Байкала с пятью параметрами антропогенного воздействия, определяемыми для территорий муниципальных образований БПТ, к которым были отнесены как показатели прямого АВ — объем водопотребления и сброса сточных вод, так и косвенного АВ — разрабатываемые или выработанные месторождения, геоморфологическая опасность и интенсивность эрозионных процессов. Для соотнесения двух массивов данных, соответствующих речным бассейнам и муниципалитетам, производилась процедура соотнесения их границ, подробно описанная далее. Расчеты уровня антропогенного воздействия сделаны для всей БПТ, оценки поступления загрязняющих веществ с речным стоком выполнены только для водосборов 13 крупнейших рек, расположенных в пределах БПТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами для исследования послужили данные государственной статистики Росстата и Росприроднадзора, Федерального агентства по водным ресурсам, данных органов исполнительной власти регионов, входящих в БПТ, социологических опросов населения в 36 муниципальных районах, 57 сельских поселениях

и более чем в 150 населенных пунктах, экспертных интервью с главами муниципалитетов и специалистами районных администраций, руководителями предприятий. Для определения площади нарушенных земель использовались космические снимки высокого разрешения Sentinel-2, Landsat-8, WorldView-1, WorldView-2 с дальнейшей проверкой ключевых участков в ходе экспедиционных исследований. Сведения о локализации месторождений разных видов полезных ископаемых получены на сайте Роснедр (<https://rosnedra.gov.ru/>). Средствами ГИС были оценены площади всех контуров нарушенных земель для каждого временного среза, их динамика за период 2014–2022 гг. в разрезе муниципальных образований БПТ.

При оценке состояния притоков оз. Байкал задействована актуальная база данных по замыкающим створам рр. Селенга, Баргузин, Турка, Тья, Верхняя Ангара, Снежная, Кичера, Голоустная, Бугульдейка, Утулик, Кика, Фролиха, Большая Черемшана. Для оценки динамики стока по большинству рек БПТ использованы данные с 1976 по 2020 г., а по р. Кике, где в 2005 г. пост перенесен из с. Хаим в п. Кика они приведены к единому ряду по реке-аналогу.

Методика оценки роли антропогенного фактора формирования уровня загрязнения основана на сопряженном анализе уровня АВ и состояния речных систем по бассейнам и муниципалитетам. Она состоит из 5 этапов исследования: 1) комплексная оценка АВ; 2) оценка выноса приоритетных загрязнителей с речным стоком по замыкающим створам притоков Байкала; 3) оценка нарушенности земель; 4) оценка сопоставимости границ муниципальных образований и речных бассейнов; 5) мультикомпонентная оценка поступления ЗВ в оз. Байкал с речным стоком по муниципальным районам.

1. Комплексная оценка АВ. Методика включает обоснование структуры комплексного индекса АВ, набора показателей, способов их нормирования, взвешивания и интегрирования. На муниципальном уровне отбор показателей, основанный на принципах системности, достоверности, выраженной территориальной дифференциации и наличия четко интерпретируемой динамики, сталкивается с проблемой статистической обеспеченности. Индекс АВ включает: показатели плотности выбросов от стационарных источников, автотранспорта и маломерных судов, автономных систем отопления; объема водопотребления и загрязненных стоков на душу населения; плотности коммунальных и промышленных отходов с учетом класса опасности; аграрной нагрузки; доли лесов, погибших под воздействием неблагоприятных факторов и пройденных

пожарами; плотности постоянного и сезонного населения и др. Площадь нарушенных земель определялась на основе дешифрирования космических снимков, для расчета выбросов от печного топлива была разработана методика, основанная на данных опросов населения и подсчете числа домохозяйств (Антонов и др., 2023).

Все показатели нормировались относительно стабильных референсных значений за 2014–2022 гг. и умножались на вес каждого показателя, определенный как среднее значение баллов, поставленных экспертами в диапазоне 1–9. В качестве экспертов были опрошены 47 представителей разных научных школ, академических институтов и ВУЗов, специалистов в области составления экологических рейтингов и представителей системы управления природопользованием на территории БПТ (табл. 1_ДМ; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.7868/S2658697525030096>).

2. Оценка выноса загрязнителей с речным стоком в оз. Байкал проводилась на основе данных полевых и лабораторных исследований для 13 рек БПТ: Селенги, Бугульдейки, Голоустной, Утулика, Снежной, Кики, Турки, Тыи, Кичеры, Верхней Ангары, Фролихи, Большой Черемшаны и Баргузина. Годовые значения были определены на основе результатов химического анализа 49 проб воды и такого же количества проб взвешенных наносов размером менее 0.45 мкм, отобранных в 2022 г. в разные фазы водного режима: зимнюю межень (март), весенне-летнее половодье (июнь) и летне-осенний паводок (август). Пробы были проанализированы на содержание широкого комплекса химических элементов методами ICP-AES и ICP-MS в ВИМС им. Н.М. Федоровского. В данном исследовании в качестве приоритетных загрязнителей были приняты тяжелые металлы и металлоиды V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mo, P, Sb, Sn, U в растворенной и взвешенной формах. Концентрации элементов C умножались на осредненную величину водного стока Q_0 м³/год, определенную для замыкающего створа бассейна по сетевым данным, что позволило оценить сток веществ с территории данного бассейна в Байкал (т/год):

$$W_x = C \times Q_0. \quad (1)$$

Содержания тяжелых металлов и металлоидов и результаты расчетов их годового стока в оз. Байкал приведены в (табл. 3_ДМ, табл. 4_ДМ).

3. Оценка нарушенности земель позволяет охарактеризовать последствия горнодобывающей деятельности для экологической ситуации в регионе не только по площади нарушенных

земель, но и с учетом их позиции, влияющей на интенсивность и характер транспорта загрязняющих веществ. Расчет площади нарушенных земель осуществлялся методом визуального дешифрирования космических снимков. Для учета влияния геоморфологической позиции разрабатываемых месторождений проводился анализ материалов дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа, опубликованных данных (Абалаков, Базарова, 2015; Белозерцева и др., 2021), а также результатов экспедиционных исследований в летний период 2022 г. Это позволило типизировать геоморфологические позиции участков нарушенных земель горнопромышленного освоения. Были выделены плоские вершинные поверхности междуречий, приводораздельные территории в условиях пересеченного рельефа, склоновые участки, площадки надпойменных террас и поверхности подгорных шлейфов и педиментов, притальвежные зоны небольших долин постоянных и временных водотоков, пойменно-руслевой комплекс долин рек, днища замкнутых котловин, в том числе занятых озерами; площадки обширных озерных террас, днища обширных межгорных котловин, дренируемые малыми водотоками.

Степень влияния каждой позиции в рельефе на транспорт загрязнителей оценивалась в баллах (табл. 2_ДМ), исходя из *геолого-геоморфологических критериев*, влияющих на возможность транспорта поллютантов: характера антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений, стадии рекультивации, типа добываемого сырья, геоморфологической позиции участка месторождения. Использовался метод анализа иерархий (Alonso et al., 2006; Hawker et al., 2022; Saaty, 2008) с привлечением шести экспертов-геоморфологов. Осреднение частных экспертных оценок показало, что наибольший вес среди выбранных критериев имеет геоморфологическая позиция участка (0.414), затем в порядке убывания следуют тип добываемого сырья (0.265), стадия рекультивации (0.198), характер антропогенной трансформации рельефа и состав поверхностных отложений (0.122).

Комплексный показатель геоморфологической опасности нарушенных земель при горнопромышленном освоении ($\Gamma_{\text{нз}}$) рассчитывался как произведение площади каждого контура нарушенных земель (м²) на показатель его геоморфологической опасности. Сумма таких произведений по всем участкам нарушенных земель внутри отдельного муниципального образования может рассматриваться как характеристика совокупной геоморфологической опасности земель, нарушенных при горнопромышленном освоении, в границах данного муниципального образования. Показатель геоморфологической опасности для

отдельных контуров нарушенных земель определялся как сумма балльных оценок по 4 критериям, взвешенным на коэффициент их значимости (Еременко и др., 2021). Значения комплексного показателя $\Gamma_{\text{нз}}$ изменяются 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 $\Gamma_{\text{нз}} = 1$ — наименее опасным.

Расчет комплексного показателя геоморфологической опасности нарушенных земель позволил существенно более детально охарактеризовать последствия горнодобычи для экологической ситуации в регионе, так как учитывает не только площадь нарушенных земель, но и другие факторы, влияющие на возможность транспорта поллютантов 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.

Уровень потенциальной *эрозионной опасности* определяется позицией территории в рельефе и провоцируется рядом антропогенных факторов, в частности развитием сельского хозяйства (Naregeweyn et al., 2017). Для определения эрозионной опасности муниципальных районов БПТ на основе универсального уравнения эрозии почв (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) и рекомендаций действующего ГОСТ 17.4.4.03-86 была произведена крупномасштабная (1 : 2000) оценка дождевой эрозии почв по методике, основанной на использовании глобальных цифровых моделей рельефа с размером ячейки 23 м (FABDEM) и карт землепользования, построенных по данным снимков Sentinel-2 (ESRI Land Cover) (Цыпленков и др., 2022).

4. Методика сопоставимости границ муниципальных образований и речных бассейнов. Статистические данные по объемам стоков и загрязненных стоков доступны только в разрезе муниципальных районов и городских округов, но отсутствуют для конкретных предприятий, что затрудняет оценку объемов и направления стока от антропогенных объектов в пределах речных бассейнов. В этой связи применялась следующая оценочная методика. В каждом муниципальном районе определялось преобладающее направление стока от населенных пунктов, исходя из их гипсометрической позиции относительно водотоков; суммарные значения объемов сточных вод и загрязненных сточных вод по муниципалитету распределялись между речными бассейнами пропорционально численности населения населенных пунктов. В соответствии с таким подходом, например, оценка антропогенного стока

в бассейне р. Голоустной производилась путем перемножения сброса сточных вод всего Иркутского муниципального района на долю Голоустненского сельского поселения в численности населения муниципалитета. При расчетах также учитывался слой стока по каждому речному бассейну для определения степени разбавления сточных вод и загрязненных сточных вод антропогенного происхождения.

Степень нагрузки на водные ресурсы характеризовалась как отношение объема сточных вод к объему местных возобновляемых водных ресурсов, принимаемых равным величине изменения речного стока на рассматриваемой территории.

5. Методика мультикомпонентной оценки привноса загрязняющих веществ в оз. Байкал с речным стоком по муниципальным районам. Для расчета нагрузки взвешенных и растворенных форм Be, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Си, Zn, As, Cd, Pb, Bi, W, Al, Hg, P был разработан следующий алгоритм:

Полученное значение стока загрязняющих веществ с территории каждого из водосборов пересчитывалось на вклад отдельных муниципалитетов с учетом нагрузки каждого из муниципалитетов по следующим параметрам, потенциально имеющим максимальное влияние на формирование качества воды: объем сброса сточных вод $W_{\text{ст. вод}}$, объем сброса загрязненных сточных вод $W_{\text{загр. ст. вод}}$, доля нарушенных земель $F_{\text{нар.}}$, доля нарушенных земель с учетом геоморфологической опасности $F_{\text{нар. опас.}}$; объем потенциальной эрозии ЭР, т/га/год (формула 2). Роль указанных факторов в формировании потоков подтверждалась корреляционным анализом между концентрациями и составляющими АВ. Для определения *взаимосвязи ведущих (в рамках высказанной гипотезы) факторов АВ и состояния водных ресурсов* была проведена оценка объемов сточных вод, загрязненных сточных вод и уровня нарушенности земель по водным бассейнам БПТ, на которых в 2022 г. проводились экспедиционные исследования с отбором проб воды и взвешенных наносов. Для выявления связи между содержаниями Be, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Си, Zn, As, Cd, Pb, Bi, W, Al, Hg, P во взвешенной и растворенной формах и показателями АВ (объемом сточных вод, объемом неочищенных сточных вод, долей нарушенных земель и геоморфологически опасных земель) использовались коэффициенты корреляции Кендалла. Оценка значимости коэффициента корреляции производилась с помощью теста Манна–Кендалла для $\alpha = 5\%$ уровня. При длине выборки в 11 членов (количество водосборов на которых производился отбор проб) $\alpha = 5\%$ соответствует коэффициент корреляции порядка 0.59.

Для корректного сравнения необходимо иметь в виду, что доля нарушенных земель — довольно консервативный показатель, и данные 2020 г. примерно соответствуют 2022 г., а объемы сточных вод усреднялись за период 2014–2022 гг.

Для каждого водосбора:

— проводилось ранжирование в долях от 1 индексов всех муниципалитетов, входящих в пределы данного водосбора, на основе объема сбросов сточных вод $K_{\text{ст. вод}}$:

$$\text{для } MO_1: K_{\text{ст. вод } 1} = W_{\text{ст. вод } 1} / (W_{\text{ст. вод } 1} + W_{\text{ст. вод } 2} + \dots + W_{\text{ст. вод } i}), \quad (3)$$

$$\text{для } MO_2: K_{\text{ст. вод } 2} = W_{\text{ст. вод } 2} / (W_{\text{ст. вод } 1} + W_{\text{ст. вод } 2} + \dots + W_{\text{ст. вод } i}), \quad (4)$$

...

$$\text{для } MO_i: K_{\text{ст. вод } i} = W_{\text{ст. вод } i} / (W_{\text{ст. вод } 1} + W_{\text{ст. вод } 2} + \dots + W_{\text{ст. вод } i}), \quad (5)$$

где $W_{\text{ст. вод}}$ — объем сточных воды, 1, 2...i — номер муниципалитета в пределах водосбора.

Таким образом,

$$K_{\text{ст. вод } 1} + K_{\text{ст. вод } 2} + \dots + K_{\text{ст. вод } i} = 1. \quad (6)$$

По аналогичной методике проводилось ранжирование в долях от 1 индексов всех муниципалитетов, входящих в пределы данного водосбора, на основе объема неочищенных сбросов сточных вод $K_{\text{загр. ст. вод}}$, доли нарушенных земель $F_{\text{нар.}}$, индекса опасности нарушенных земель $F_{\text{нар. опасн.}}$ и интенсивности потенциальной эрозии ЭР (т/га/год).

Далее проводилось определение нагрузки W_{xi} (т/год) по загрязняющему веществу x для каждого муниципального образования i в пределах каждого водосбора:

$$W_{xi} = W_x (K_{\text{ст. вод } i} + K_{\text{неоч. ст. вод } i} + K_{\text{нар. } i} + K_{\text{нар. опасн. } i} + K_{\text{эр } i}) / 5. \quad (7)$$

Таким образом, получен вклад (в абсолютных величинах) каждого муниципального образования в суммарный вынос загрязняющего вещества в пределах водосбора:

$$W_{x1} + W_{x2} + \dots + W_{xi} = W_x, \text{ (т/год)}. \quad (8)$$

Последним этапом было суммирование величин нагрузки для частей одного муниципалитета, расположенных в разных водосборах, для расчета единой величины нагрузки по величине привноса ЗВ (т/год) на уровне муниципалитетов. Принимая во внимание роль природных факторов в формировании химического загрязнения, полученные оценки из абсолютных величин

ранжировались в долях от 1 для относительной характеристики муниципальных образований по нагрузке Be, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Си, Zn, As, Cd, Pb, Bi, W, Al, Hg, P.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Антропогенные факторы загрязнения рек бассейна оз. Байкал

Объем водопотребления в пределах БПТ в последние годы достаточно стабилен и составляет около 1050 млн м³ в год³. Основным источником водоснабжения являются поверхностные воды (84.5%). Забор воды для хозяйственно-бытовых нужд и муниципальных котельных как правило осуществляется из подземных источников, доля которых составляет 15.5%. Поэтому значительная часть периферийных районов с численностью населения до 25 тыс. чел. без энергетических предприятий находится полностью или в большой степени на подземном водоснабжении. За пределами городов и крупных населенных пунктов часто отсутствует централизованная система водоснабжения, поэтому водопотребление из подземных источников через индивидуальные скважины органами статистического учета не фиксируется. Преобладание подземных вод характерно для части городов и поселков (Улан-Удэ, Северобайкальск, Петровск-Забайкальский, Черемховский). По мере увеличения промышленного водопотребления растет поверхностный водозабор. В центральных районах Бурятии поверхностные воды используются на орошение (рис. 1).

Очаговый характер освоения, низкая плотность населения, экономическая неразвитость сельских районов и одновременно присутствие водоемких отраслей (энергетика и целлюлозно-бумажная промышленность) создает высокий уровень территориальной концентрации водопотребления в районах дислокации крупных предприятий. Ангарский городской округ (ГО) — один из крупнейших промышленных узлов Восточной Сибири (395 млн м³ в год), Муйский район специализируется на золотодобыче (46 млн м³), в Селенгинском районе расположена Гусиноозерская ГРЭС (357 млн м³ в год), а в Кабанском — целлюлозно-картонный комбинат, но за счет внедрения на предприятии системы оборотного водоснабжения район повышенным водопотреблением не выделяется (6.7 млн м³). На эти районы приходится 80–90% общего водопотребления и сброса стоков БПТ. В первую десятку муниципалитетов по уровню водозабора

³ База данных Федерального агентства водных ресурсов Российской Федерации / ЕМИСС. <https://www.fedstat.ru/indicator/34563> (дата обращения 15.12.2023).

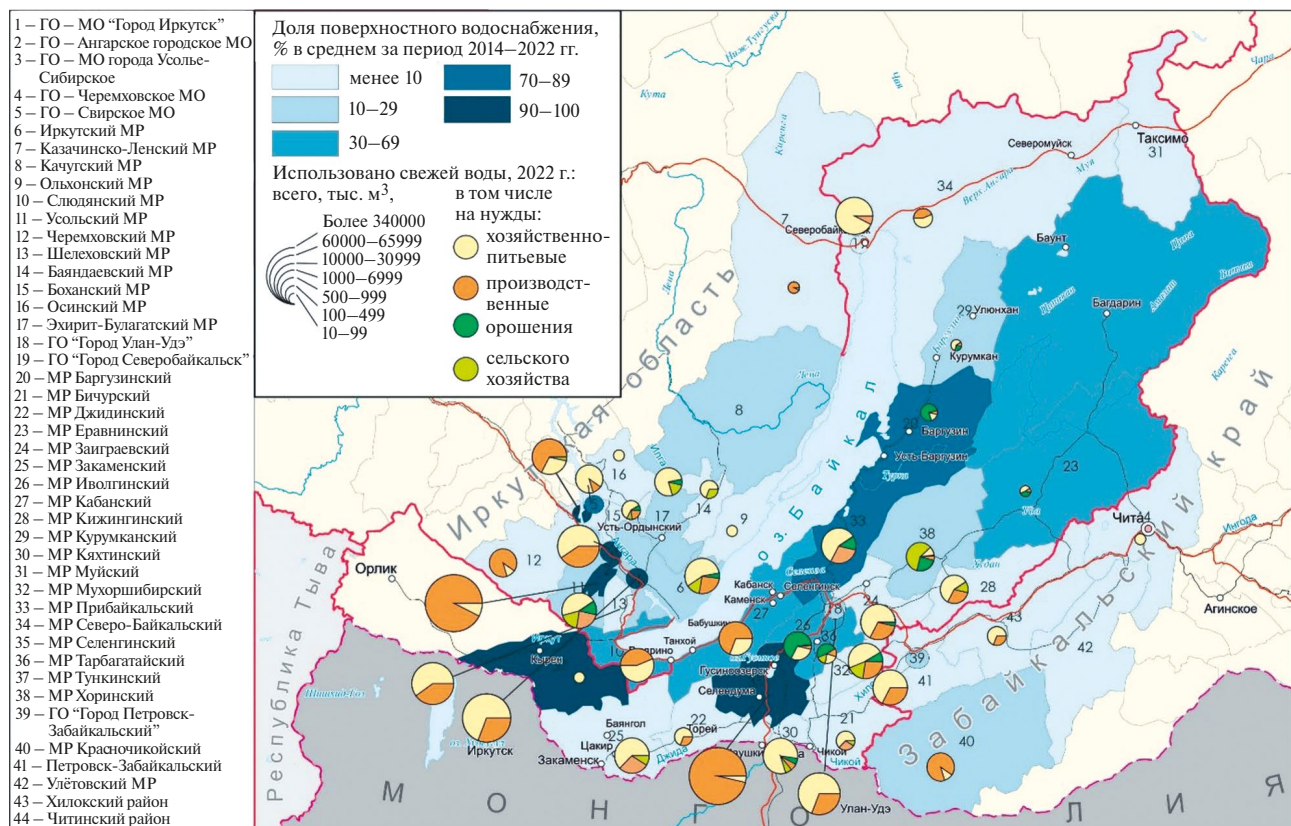


Рис. 1. Объем, структура и источники водопотребления муниципальных образований Байкальской природной территории.

Примечание: здесь и далее карты оценки отдельных параметров АВ сделаны для всей Байкальской природной территории, затем использованы для сравнительного анализа только для водосборов 13 крупнейших рек, границы частных водосборов, использовавшихся для расчета слоя стока в пределах муниципальных образований, приведены на рис. 1 ДМ.

Рассчитано по данным Росводресурсов [База данных Федерального агентства водных ресурсов Российской Федерации / ЕМИСС. <https://www.fedstat.ru/indicator/34563> (дата обращения 15.12.2023)] и данным органов исполнительной власти.

также входят региональные столицы (Иркутск – 3-е место в 2022 г. и Улан-Удэ – 7-е место), где главным потребителем являются ТЭЦ, но важным фактором также становится население. При этом в Улан-Удэ доля населения, которое подключено к централизованному водоснабжению и канализации, значительно ниже. Для большинства городов характерно снижение водопотребления на 15–50% в бытовом и энергетическом секторах.

Объем сброса сточных вод – важнейший индикатор уровня антропогенного воздействия на водные ресурсы, он представлен в основном условно-чистыми (преимущественно теплыми) стоками ТЭЦ или котельных. Поэтому для сброса сточных вод также характерна высокая и растущая степень территориальной концентрации, лидеры по сбросу стоков аналогичны лидерам по водопотреблению, различается лишь их положение (см. рис. 1): Селенгинский район сбрасывает больше стоков, что связано со спецификой производственных процессов

(Гусиноозерская ГРЭС – 356 млн м³, используя воду как теплоноситель, сбрасывает большую ее часть обратно в окружающую среду), затем Ангарский ГО и города-региональные столицы, меньшие по величине промышленные центры и ряд сельских районов. Разница между районами по объему сброса стоков гораздо выше, чем по забору воды: не представлена группа районов со “средними” показателями, как в случае с забором воды (Еравнинский, Кижингинский, Курумканский МР – около 10 тыс. м³), что говорит о том, что значительная часть потребленной воды не проходит через очистные сооружения и организованные стоки.

Рост объема сточных вод связан с точками роста в регионе, в районах, не имеющих прямого стока в озеро. В Ангарске наблюдался рост их объемов на 28%, в золотодобывающих районах (Красночойском, Муйском, Улетовском) – в 1.5–2.5 раза. Сокращение объема стоков связано либо с сокращением численности

населения, либо со строительством или модернизацией очистных сооружений на крупных объектах энергетики и централизованного ЖКХ (Селенгинский район, МО Шелеховский и ГО Черемхово).

Сброс загрязненных сточных вод, т.е. без очистки или недостаточно очищенных представляет особую опасность, но в основном формируется в муниципалитетах, не имеющих стока в Байкал. Лидируют промышленные узлы Приангарья, региональные центры, районы с отдельными крупными предприятиями. Положение лидеров в рейтинге в целом довольно стабильно и почти не изменяется. Наибольшая доля загрязненных стоков приходится на Иркутск (76.7 млн м³), Ангарск (48.7 млн м³), Улан-Удэ (18.7 млн м³) и районы, входящие в агломерацию. В Усолье-Сибирском (8.9 млн м³) ключевое предприятие города – комбинат “Усольехимпром” – в настоящее время не работает, однако на площадке сохраняются накопленные отходы, они не формируют стоков, опасность представляют оползневые грунты, загрязненные нефтепродуктами и ртутью. У предприятия на балансе был комплекс очистных сооружений, которые также попали под рекультивацию, в результате у города сейчас не хватает мощностей очистных сооружений. Современные стоки ГО Усолье-Сибирское формируются в результате сбросов с устаревших очистных (по нацпроекту “Чистая вода” профинансировали проект новых насосов) и сбросов оставшихся предприятий (Химфармзавод, мясокомбинат, ЦДПС “Руссоль”, “Кристалл”, фабрика мороженного). Преобладают загрязненные стоки в городах Черемхово, Северобайкальск, Шелехов, в Петровск-Забайкальском и Шелеховском МО, Мухоршибирском, Слюдянском, Кижингинском, Закаменском районах. В районах Центральной экологической зоны БПТ (ЦЭЗ) сточные воды вывозятся на очистные сооружения (по данным администрации района).

Степень нагрузки на водные ресурсы характеризовалась как отношение объема сточных вод к объему местных водных ресурсов. Результаты расчета среднегодового слоя стока в пределах МО показали его наименьшую величину в пределах Тарбагатайского (8 мм) и Заиграевского (9 мм) районов, расположенных в нижнем течении рр. Селенги и Уды. Наибольший слой стока был получен для Слюдянского и Северо-Байкальского районов, на территории которого расположены ряд хребтов (Хамар-Дабан, Баргузинский, Северо-Муйский, Верхне-Ангарский, Байкальский), которые способствуют как большому количеству выпадающих осадков, так и большой величине коэффициента стока за

счет расчлененного рельефа и распространения многолетнемерзлых пород.

Для большинства МО объем сточных вод пренебрежимо мал по сравнению с местными водными ресурсами – для 22 из 37 территорий это соотношение не превышает 0.1%, а для 15 муниципальных образований данные о сточных водах отсутствуют вовсе (рис. 2). При этом степень нагрузки зависит, главным образом, от объема сточных вод. Наибольшая нагрузка выявлена для Селенгинского района, в котором расположен один из самых крупных источников водопотребления и водоотведения – Гусиноозерская ГРЭС. Ее стоки условно чистые, т.е. большие объемы сочетаются с низкой токсичностью, поскольку это конденсационные теплые воды, которые сбрасываются в само озеро. Значительная нагрузка характеризует Улан-Удэ с Иволгинским районом, где относительно высокая плотность населения сочетается с малым объемом местных водных ресурсов. В данном случае надо учесть, что значительная часть населения Улан-Удэнской агломерации имеет подземное водопотребление и локальные системы водоотведения, численность населения агломерации сильно недооценена официальной статистикой. Фактически речь идет об объемах водоотведения ТЭЦ Улан-Удэ. При этом эти территории обладают значительным объемом транзитного стока (рр. Селенга и Уда), что обеспечивает разбавление поступающих сточных вод. В целом повышенная нагрузка на водные ресурсы (>10% составляет объем стоков по сравнению с местными водными ресурсами) характерна для территорий, включающих городские округа.

Самыми большими колебаниями водообеспеченности характеризуются г. Чита и Читинский район, что связано со значительной динамикой среднегодового слоя стока, различающегося между 2014 и 2018 гг. почти в 10 раз. Однако ГО Чита в БПТ не входит, как и большая часть Читинского района, из которого только система Арахлейских озер, Беклемишевское и Арахлейское поселения входят в БПТ. Средняя нагрузка характерна для Улетовского района, в пределах которого золотодобыча – основной источник сточных вод, он тоже не входит в БПТ. В Муйском и Тункинском районах в зоне БПТ нет населения и хозяйствующих субъектов.

Таким образом, данный показатель на муниципальном уровне больше зависит от колебаний ресурсов поверхностного стока по годам, поскольку объем сточных вод, формируемый крупными источниками, относительно стабилен. Наиболее проблемными по нагрузке сточных вод на местные водные ресурсы являются Слюдянское МО (~50%), Улан-Удэнская (Иволгинский

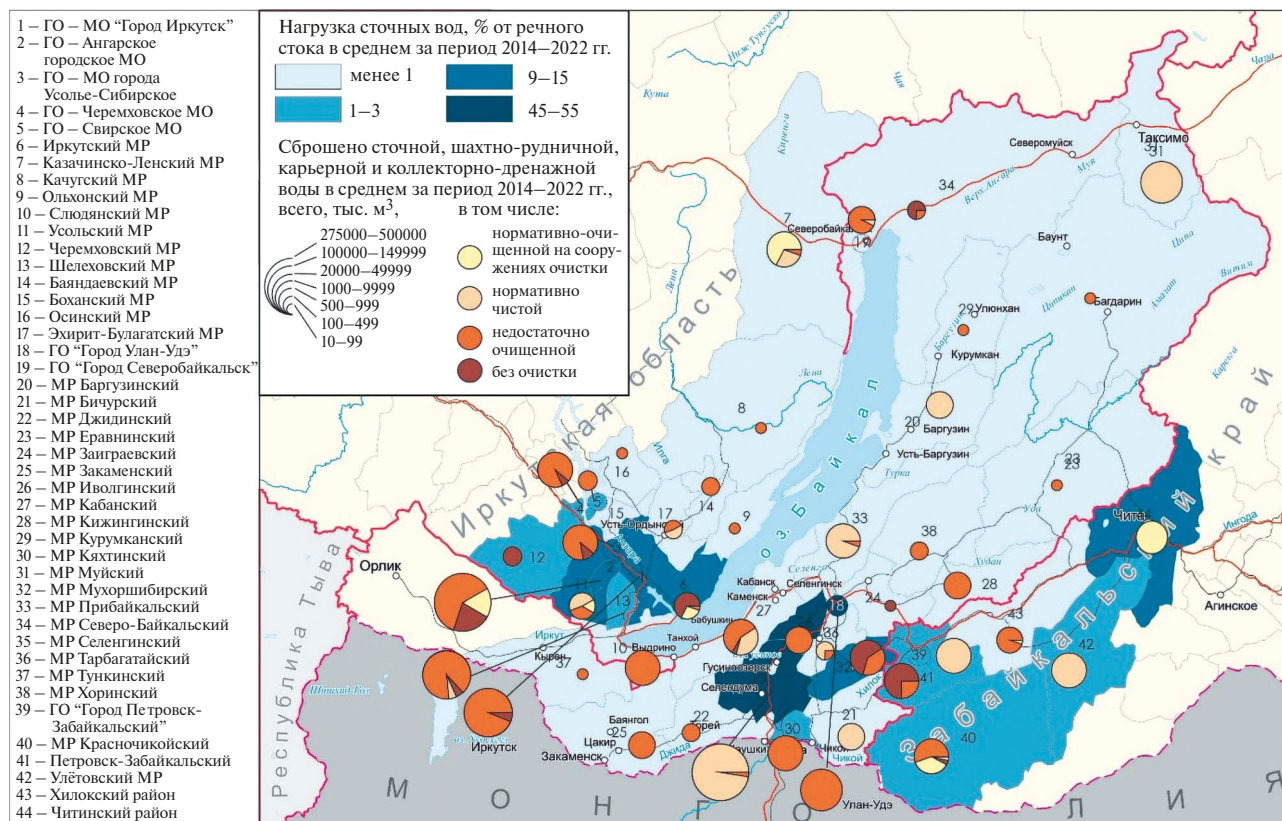


Рис. 2. Объем сточных вод (% от местных водных ресурсов) и сброс сточных вод разного уровня очистки в муниципальных образованиях Байкальской природной территории в 2022 г.

Рассчитано по данным Росводресурсов [База данных Федерального агентства водных ресурсов Российской Федерации / ЕМИСС. <https://www.fedstat.ru/indicator/34563> (дата обращения 15.12.2023)] и данным органов исполнительной власти.

район – 45.7%) и Иркутско-Черемховская агломерации (13.3%), а также Мухоршибирский район (10.6%) – лидер по добыче угля открытым способом в пределах БПТ. В целом повышенная нагрузка на водные ресурсы (>10%) характерна для территорий, включающих городские округа.

Комплексный показатель потенциального воздействия земель, нарушенных при горнопромышленном освоении, на окружающую среду представляет собой результат суммирования произведения площади участков нарушенных земель на полученное для них значение комплексного показателя геоморфологической опасности внутри каждого муниципального образования (рис. 3).

Оценка показала, что лидирующие позиции занимают муниципальные образования, где продолжается широкомасштабная добыча каменного угля (Мухоршибирский и Петровск-Забайкальский районы), руд цветных металлов (Закаменский, Петровск-Забайкальский районы) и разработка россыпных месторождений золота (Закаменский, Красночирский районы). Абсолютным лидером по площади нарушенных земель по состоянию на 2020 г. был Петровск-Забайкальский район (4395 га), по значению

комплексного показателя геоморфологической опасности нарушенных земель лидирует Красночирский район. Такая ситуация связана с типом разрабатываемого сырья и геоморфологической позицией месторождений в районе, где преобладают россыпные месторождения в долинах рек, характеризующиеся техногенным поступлением особо опасных веществ (ртуть), а также расположением в днищах долин, что благоприятно для выноса поллютантов за пределы участков горнодобычи.

Как и для большинства видов АВ, уровень геоморфологической опасности сильно дифференцирован. В пределах Республики Бурятия значения комплексного показателя геоморфологической опасности нарушенных земель, полученные для Кяхтинского, Иволгинского, Баргузинского районов и городского округа Улан-Удэ, примерно в сто раз меньше, чем для Мухоршибирского района, а для Осинского и Баяндаевского районов Иркутской области в 400 раз меньше, чем для Черемховского района, что обусловлено локализацией участков горнодобычи. Разнообразие геоморфологических позиций обуславливает широкий спектр возможных путей

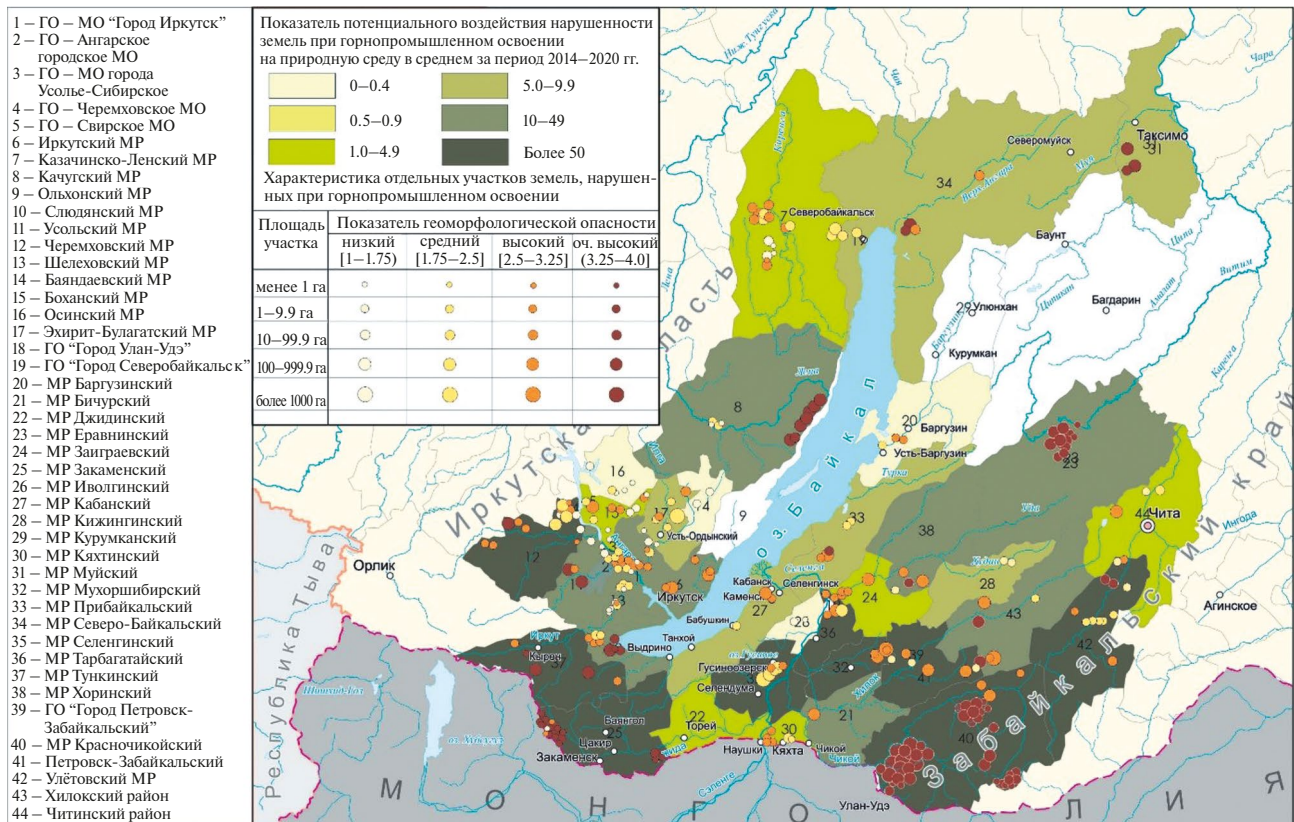


Рис. 3. Геоморфологическая опасность нарушенных горной добычей земель по состоянию на 2020 г.

и вариантов воздействия участков нарушенных земель на функционирование природных систем. Холтосонское и Инкурское месторождения вольфрамовых руд в Закаменском районе занимают приводораздельную часть Джидинского хребта, при этом непосредственно в ходе горнодобычи часть его была “съедена”, абсолютные отметки водораздела снизились более, чем на 100 м, что обусловило благоприятные условия для миграции загрязняющих веществ в долины рек, разделенных водораздельным хребтом. При этом поллютанты могут переноситься не только в растворенном виде, но и в составе достаточно крупных твердых частиц (песок, дресва), чему способствуют значительные уклоны как склонов, так и тальвегов постоянных и временных водотоков в пределах не рекультивируемых участков месторождений.

Совершенно иначе распространяются ЗВ, если разрабатываемое месторождение занимает замкнутую бессточную котловину, например, активно разрабатываемое Окинское месторождение каменного угля в Бичурском районе, где, кроме создания крупной антропогенной формы глубиной более 100 м, в соседние участки котловины производится откачка карьерных вод с накоплением тонкодисперсного рыхлого материала. Многие котловины, вмещающие угольные месторождения, в настоящее время дрени-

руются водотоками лишь частично, например, одно из крупнейших угольных месторождений Саган-Нур на границе Мухоршибирского и Петровск-Забайкальского районов. Малый расход воды не способствует интенсивной миграции загрязняющих веществ в более низкие звенья гидрографической сети. В то же время, такая геоморфологическая позиция принципиально отличается от описанной выше (в днище бессточной котловины) наличием потенциальной возможности такой миграции.

Наиболее благоприятные условия для выноса загрязняющих веществ в речную сеть и дальнейшей их миграции в направлении приемного бассейна создаются в пределах нарушенных земель, расположенных непосредственно в днищах речных долин, в частности для россыпных месторождений. При разработке россыпи происходит полная трансформация естественного флювиального рельефа и возникает комплекс антропогенных форм (насыпи, плотины, отвалы и пр.), сложенных перемещенным и переработанным песчаным речным аллювием с высоким содержанием загрязняющих веществ (в частности, ртути), являющихся побочными продуктами выделения полезного компонента (золота). Формируясь непосредственно в днищах долин, поллютанты свободно мигрируют вниз по долине, распространяясь далеко за пределы участка

россыпной добычи золота. В ходе полевых работ установлено, что даже там, где добыча прекращена 15 лет назад и более, нарушенные земли полностью не рекультивированы и поступление поллютантов в речную сеть продолжается при размыве отвалов и насыпных дамб реками и ручьями.

На основании эмпирической модели эрозии почв RUSLE была посчитана среднемноголетняя интенсивность эрозии почв БПТ. Она оценивается величиной $2195 \cdot 10^6$ т/год. Наименьшие средние темпы эрозии наблюдаются на территории Еравнинского (0.13 т/га/год) и Читинского районов (0.14 т/га/год), а самые высокие региональные темпы для Северо-Байкальского (22.9 т/га/год) и Курумканского районов (12.5 т/га/год). В целом вся северо-восточная часть БПТ характеризуется высокой интенсивностью эрозии почв: (80.2%) относится к 1-му классу эрозионной опасности со средними темпами смыва < 0.5 т/га/год, а около 10.3% относится к 3-му классу опасности (1–5 т/га/год), в основном это районы Баргузинский, Тункинский. На второй класс (0.5–1 т/га/год) приходится 6.32% территории. Классы 4 и 5 класс (5–10 и более 10 т/га/год соответственно) занимают по 1.5% территории.

Оценка содержания приоритетных загрязнителей в речном стоке выявила пространственные и сезонные различия концентраций и потоков V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mo, P, Sb, Sn, U в растворенной и взвешенной формах в замыкающих створах 11 притоков Байкала (табл. 3–5 ДМ).

Для растворенных форм элементов были рассчитаны коэффициенты концентрации относительно среднего содержания в реках мира (Gaillardet et al., 2003). Анализ полученных значений подтвердил ранее полученный вывод (Kasimov et al., 2020a, b) о преимущественно анионогенной геохимической специализации Селенги, главного притока Байкала. В водах Селенги концентрируются анионогенные U, Mo, As, Sb, V, а также Sr – активный водный мигрант. Близкую геохимическую специализацию имеет р. Бугульдейка. Особенностью р. Утулик является накопление Ni и Co, рр. Баргузин и Фролиха – U и Mo. Содержание Zn в зимнюю межень в большинстве рек ниже, чем в другие сезоны, за исключением р. Снежной, где оно достигает 18 мкг/л, что в 1.8 раза выше ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения. По-видимому, это связано с коммунально-бытовыми стоками населенных пунктов в устье реки, влияние которых особенно возрастает в периоды минимального речного стока. В устьях рр. Тыи, Кичеры и В. Ангары содержание Zn не превыша-

ет 5 мкг/л, что можно объяснить промерзанием водотоков в верхней части их водосборов, где расположены рудные проявления этого металла. В летний период концентрации Zn в притоках северной части Байкала многократно возрастают: в Верхней Ангаре и Кичере до 45–55 мкг/л, в Тые – 60 мкг/л. Относительно высокое содержание Zn отмечается в водах р. Фролихи – 18 мкг/л. Содержание Cu в притоках Байкала в целом низкое (в большинстве случаев ниже 1 мкг/л) и слабо изменяется по сезонам. Минимальные значения характерны для зимней межени, когда в большинстве проб они ниже предела обнаружения (0.5 мкг/л). Концентрации растворенных Cr, Co, Ni, Cd, As, P и Sn в большинстве случаев также ниже предела обнаружения. Максимальные концентрации Ni (3.7–4.1 мкг/л) были отмечены в р. Утулик, Cd (0.04–0.07 мкг/л) – в Верхней Ангаре и Фролихе, As (1.0–1.5 мкг/л) – в Селенге, Sn (5.5 мкг/л) – в р. Кике. В зимнюю межень в рр. Бугульдейке и Тые были определены значимые содержания P: 69 и 40 мкг/л соответственно.

Для взвешенных форм химических элементов были рассчитаны коэффициенты концентрации K_c относительно среднемировых содержаний в речной взвеси (Viers et al., 2008). Наибольшее накопление тяжелых металлов и металлоидов в речной взвеси отмечалось в северных притоках Байкала. По результатам весеннего опробования (июнь) взвесь р. Тыи была обогащена Sb ($K_c = 6$), Zn, U (2–4), р. В. Ангары – Zn (5), U (3), р. Кичеры – Zn (12), U, W, Sn (4–6), Pb, Mn, Sb (2), р. Фролихи – U (40), Zn, W, Sn (4–6), Cu, Sb (2). В южных притоках значения K_c металлов и металлоидов не превышали 2–3. Во взвеси р. Баргузин было отмечено слабое накопление Mn и W, рр. Турки и Кики – Zn, Mn, Sb, U, W, Снежной – Sb, U, W, Утулика – Sn, Бугульдейки и Голоустной – Mn и Sb.

Наибольшие коэффициенты концентрации были отмечены для цинка и урана. Цинком обогащена взвесь рр. Тыи, В. Ангары, Фролихи и Кичеры, где содержания Zn превышают среднемировые в 3 и более раз. Это связано с литогеохимическими особенностями бассейнов данных рек, где имеются рудопроявления Zn и других металлов. Максимальным значением K_c Zn (12) характеризуется р. Кичера, что очевидно обусловлено влиянием шахтных вод на ее приток р. Холодную. С цинковыми месторождениями связано концентрирование целого комплекса элементов (Zn, Pb, Mn, Sb, U, W, Sn) во взвеси рр. Кичеры и Тыи. Взвесь рр. Тыи, В. Ангары, Фролихи и Кичеры, а также рр. Кики и Турки, обогащена ураном. Значения K_c в их взвеси составляет от 3 до 10, а в р. Фролихе – более 40. Это обусловлено обогащенностью ураном горных пород восточной части бассейна оз. Байкал,

в ряде исследований отмечалось накопление U в донных осадках Байкала.

Анализ коэффициентов концентрации тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) во взвеси притоков Байкала по результатам опробования в августе 2022 г. показывает, что их содержание в Селенге, Баргузине и Голоустной в целом соответствуют среднемировым. Взвесь рр. Бугульдейки, Утулика и Снежной в разной степени обогащена Mo, Zn, Cr, Ni, Sb, W. В Кике и Турке накапливаются U, Sb и Zn, В. Ангаре — U, Mo и W. Для рр. Тыи, Кичеры, Фролихи и Б. Черемшаны характерна самая широкая ассоциация накапливающихся элементов: Zn, U, Mo, Cr, Sb, W, Sn. Максимальные значения Кс Zn в Тые достигло 41, U в Б. Черемшане и Фролихе — 17 и 33 соответственно.

Отмеченные особенности дифференциации ТММ в растворенной и взвешенной форме в притоках Байкала обусловлены литогеохимическими и природно-климатическими особенностями водосборов, а также антропогенными источниками воздействия, локализованными на территории муниципальных образований. Далее для оценки вклада конкретных муниципальных образований проводился анализ связей между факторами АВ и потоками приоритетных загрязнителей.

Соотношение между величиной антропогенной нагрузки и поступления загрязняющих веществ

Поиск достоверных связей между величиной АВ и величинами поступления ЗВ в оз. Байкал проводилось на основе методики, описанной как этап 5, для оценки муниципалитетов по привносу ЗВ в оз. Байкал. Интегрально величину поступления загрязняющих веществ с основных водосборов оз. Байкал, используемую для оценки нагрузки на муниципальном уровне, характеризует (см. табл. 5_ДМ). Посчитаны средние величины относительного вклада того или иного муниципального образования в вынос Be, B, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Si, Zn, As, Cd, Pb, Bi, W, Al, Hg, P в оз. Байкал по формулам (3)–(8). Согласно принятой системе расчета, относительный вклад отдельных муниципальных образований в поступление ЗВ в оз. Байкал варьирует от 0.1 до 22% (городской округ Улан-Удэ), где 100% — суммарный привнос рассматриваемых загрязняющих веществ в оз. Байкал с водосборов 11 крупнейших притоков. По соотношению интегрального индекса АВ [ИАВ; (Антонов и др., 2023)] и средней величины вклада МО в вынос загрязняющих веществ в замыкающих створах притоков оз. Байкал можно выделить пять (I–V) типов МО (рис. 4).

I. Для городских территорий вынос загрязняющих веществ выше, чем ИАВ. Наибольший вклад в вынос загрязняющих веществ при среднем уровне АВ характерен для Улан-Удэ, Северо-Байкальска и Гусиноозерска в Селенгинском районе. Относительно меньший уровень обусловлен тем, что на городских территориях действует значительный спектр источников, которые сложно учесть статистически, в том числе с точки зрения их влияния на качество речных вод. В частности, велико влияние индивидуальной жилой застройки без канализации и централизованного водоснабжения, большую роль играет развитая сеть ливневой канализации, сток в которую с заасфальтированных городских территорий достигает максимальных значений. В Улан-Удэ высокая относительно БПТ плотность сети автодорог с твердым покрытием (11.4 км/км^2) (5-е место) с высокой интенсивностью движения легкового транспорта вследствие слабого развития общественного транспорта. Объем выбросов от автотранспорта превышает 30 тыс. т в год, что является не только источником загрязнения атмосферы, но и вторичного загрязнения поверхностных вод (Разработка ..., 2023). Высокие значения эрозии, характерные для условий лесостепной зоны района Улан-Удэ, определяет загрязнение речных вод продуктами размыва почв (Chalov and Ivanov, 2023). В Улан-Удэ имеется целый ряд источников поступления Sr, Mo, U, As, W, Al, Fe, Mn, Cu, V, Sb, Ni, Pb и других поллютантов (Сычева, Кошелева, 2024).

В Селенгинском районе объем сточных вод в десятки раз больше, чем в других городах, но стоки представлены условно чистыми (теплыми) стоками Гусиноозерской ГРЭС, что практически не несет опасности химического загрязнения. Плотность дорожной сети в городе небольшая (12 км/км^2), доля заасфальтированных территорий незначительная, поэтому поверхностный смыв незначительный. Город изолирован от Селенги и ее притоков.

Северобайкальск — город, который строился по единому плану, как и другие города на БАМе, поэтому в нем выше плотность дорожной сети, уровень централизованного теплоснабжения, между городом и рекреационной зоной на оз. Байкал проходит железная дорога. Основной вклад в загрязнение атмосферы Северобайкальска вносят выбросы автотранспорта и сжигание Канско-Ачинского угля на Центральной ТЭЦ, а также дров и частично угля в частном секторе в западной части города. Город является источником поступления U, W, Fe, Mn, Zn, Cu, Sb, Pb, P (наибольший вклад для города Zn и Cu). Широкий спектр загрязняющих веществ в поверхностных водах свидетельствует о том, что

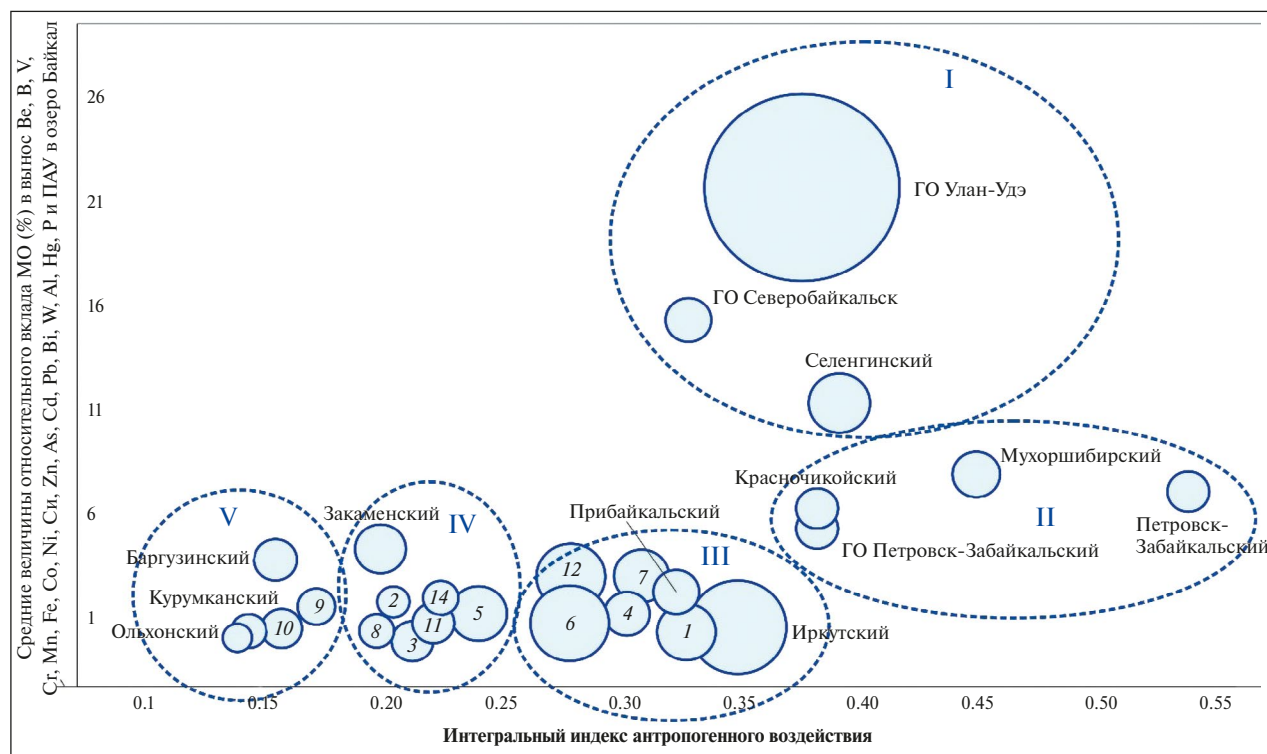


Рис. 4. Распределение муниципальных образований Байкальской природной территории по интегральному индексу АВ (ИАВ) и величине относительного вклада в поступление загрязняющих веществ в оз. Байкал со стоком крупнейших притоков.

Примечание: размер значка пропорционален численности населения. Цифрами на графике обозначены муниципальные районы: 1 – Слюдянский, 2 – Баяндаевский, 3 – Бичурский, 4 – Тарбогатый, 5 – Кяхтинский, 6 – Читинский, 7 – Кабанский, 8 – Северо-Байкальский, 9 – Хоринский, 10 – Еравнинский, 11 – Джидинский, 12 – Иволгинский, 14 – Хилокский.

в структуре факторов воздействия важно учесть ливневой сток с заасфальтированных городских территорий. Такая структура загрязнения почти не сказывается на поступлении поллютантов в озеро с речным стоком р. Тый.

II. Горнодобывающие территории характеризуются высоким уровнем как относительного вклада в вынос металлов и металлоидов, так и АВ. Это в основном крупные добывающие районы со средним уровнем геоморфологической опасности для водных систем (Мухоршибирский район с крупнейшим Тугнуйским разрезом в бессточной котловине), или меньшими объемами добычи, но высоким уровнем геоморфологической опасности. Так, Петровск-Забайкальский район, в котором расположен Тигнинский разрез на правобережной террасе р. Хилок, характеризуется средними уровнями вклада в вынос всех элементов, кроме Zn. В Красночикойском районе работают Гутайский молибденовый рудник, Воскресенский рудник золотосодержащих руд, Чикойский прииск, угледобывающее предприятие АОЗТ “Турмалхан”; действует АООТ “Разрез Зашуланский”, разрабатывающее Малханское месторождение цветного турмалина. В г. Петровске-Забайкальском после закрытия и лик-

видации металлургического завода ключевым источником загрязнения стала рекультивация отвалов и переработка шлаков предприятия для извлечения оставшихся металлов. Несмотря на различие добываемых ресурсов, особенности залегания, горных пород, спектр тяжелых металлов и металлоидов, по относительному вкладу в вынос которых данные районы имеют высокие значения, общий: Sr, Mo, U, As, W, Al, Fe, Mn, Cu, V, Sb, Ni, Pb, P. Для районов добычи полезных ископаемых в бассейне р. Селенги отмечался значительный рост мутности речных вод и доли взвешенных форм миграции тяжелых металлов и металлоидов. Непосредственно вдоль участков добычи золота Заамар в бассейне р. Туул отмечался рост потоков взвешенных форм В и W (до 3 раз), V, Fe, Cr, Ni, Mn, As (до 36–60 раз), а также растворенных Mo (2.5 раза), Mn (2.8), U (4.8), V (5), W (6.3), As (11.5) (Jarsjö et al., 2017; Pietroni et al., 2017). Многократный рост потоков взвешенных форм металлов и металлоидов отмечался по длине р. Джиды ниже предприятий добычи полезных ископаемых г. Закаменск (Смирнова, Плюснин, 2013; Lychagin et al., 2017).

Две следующие группы районов имеют примерно равный вклад в вынос загрязняющих ве-

ществ, но различаются по уровню АВ, поскольку в III группе МО в силу своего экономико-географического положения обладают большей численностью населения и связанной с ней нагрузкой, а в IV — основным фактором, вероятно, являются нерекультивированные отвалы закрытых предприятий.

III. Районы — пригороды региональных столиц и расположенные непосредственно на берегу Байкала с высоким уровнем плотности населения, дорожной сети, рекреационной нагрузки характеризуются средним вкладом в вынос приоритетных загрязнителей *и средним индексом антропогенного воздействия* (Иркутский, Читинский, Иволгинский, Прибайкальский, Слюдянский, Кабанский, Заиграевский). Ключевым фактором является относительно большая численность населения и положение непосредственно на берегу оз. Байкал. Из периферийных районов в данную группу попадают МР, активно развивающиеся в последние годы (Бичурский). Последний характеризуется средним уровнем АВ, несмотря на значительные масштабы добычи угля, геоморфологическая позиция формирует меньшую степень опасности.

IV. Аналогично средним вкладом в вынос приоритетных загрязнителей при пониженном уровне АВ характеризуются районы закрытых предприятий по добыче и обогащению руд цветных металлов (Кяхтинский, Закаменский, Хилокский). Данные районы располагаются вдоль крупнейших притоков (рр. Хилок, Джида, Уда, Селенга).

V. Группа с наименьшим уровнем АВ и вкладом в поступление приоритетных загрязнителей — это периферийные районы (Еравнинский, Хоринский, Баргузинский, Курумканский и др.). В структуре воздействия здесь преобладают лесной комплекс, животноводство, небольшие добывающие предприятия.

Таким образом, ведущим фактором современного состояния экосистем БПТ является АВ, не только сегодняшнее, но и унаследованное от периода ускоренной индустриализации. Сравнение с величинами относительного вклада того или иного МО в вынос приоритетных загрязнителей показал, что на уровень загрязнения поверхностных вод оказывает влияние не столько количественное измерение АВ, сколько его тип, определяемый специализацией производства, длительностью освоения и степенью модернизации.

ВЫВОДЫ

Комплексный анализ социально-экономических процессов, формирующих антропогенное воздействие, природных процессов, формирующих характер распространения загрязняющих веществ, и уровня загрязнения поверхностных

вод в замыкающих створах речных бассейнов БПТ позволил сделать как методические, так и практические выводы.

1. Впервые для БПТ и ее речных бассейнов разработана комплексная методика районирования поступления загрязняющих веществ в реки конкретно с территориями муниципалитетов. Она основана на соотнесении границ речных бассейнов, по которым распространяется загрязнение, и административных границ, в рамках которых осуществляется управление и статистический мониторинг. На этом принципе рассчитывается объем поверхностного стока в разрезе муниципальных районов, что является основой для оценки нагрузки на водные источники.

2. Для большинства муниципальных образований объем сточных вод пренебрежимо мал по сравнению с местными водными ресурсами. Негативным является тренд на усиление локализации загрязнения в трех городских агломерациях: Иркутско-Черемховской, Улан-Удэнской и Северобайкальской. При этом данные территории обладают значительным объемом транзитного стока (рр. Селенга и Уда), что обеспечивает разбавление поступающих сточных вод. В целом повышенная нагрузка на водные ресурсы (>10%) характерна для территорий, включающих городские округа. Однако, исследование показало, что необходимо в будущем учитывать и диффузный сток городских территорий, а также стоки сельских населенных пунктов, расположенных на берегу оз. Байкал. Среди других территорий, оказывающих существенный вклад в привнос загрязняющих веществ с речным стоком в оз. Байкал, выделяется Мухоршибирский район, Селенгинский район, в меньшей степени Баргузинский, Петровск-Забайкальский, Красночикойский и Петровск-Забайкальский ГО. В целом, поступление загрязняющих веществ распределено по-разному по территории БПТ и связано с разными антропогенными источниками.

3. Увеличение локализации антропогенного воздействия, усиленного природными факторами, сниженного потенциала разбавления стоков и других факторов воздействия является ограничивающим фактором для развития туризма и рекреации, особенно крупных рекреационных комплексов. В области энергетики снижение локализации водопользования можно достигнуть при увеличении использования возобновляемых источников энергии не только более экологических, но и адекватных типу расселения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта № 8/Д-2021 “Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния

окружающей среды озера Байкал”, НИР ГЗ МГУ кафедры экономической и социальной географии России № 121051100161-9 “Современная динамика и факторы социально-экономического развития регионов и городов России и стран Ближнего Зарубежья”, кафедры геоморфологии и палеогеографии № 121040100323-5 “Эволюция природной среды в кайнозой, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования”, программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the project no. 8/D-2021 “Development of an Integrated Assessment of Anthropogenic Impact and the State of the Environment of Lake Baikal,” research work of the state assignment of the MSU’s department of Economic and Social Geography of Russia no. 121051100161-9 “Modern Dynamics and Factors of Socio-Economic Development of Regions and Cities of Russia and Neighboring Countries,” department of Geomorphology and Paleogeography no. 121040100323-5 “Evolution of the Natural Environment in the Cenozoic, Topography Dynamics, Geomorphological Hazards and Risks of Nature Management,” development programs of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Антонов Е.В., Беляев Ю.Р., Битюкова В.Р., Бредихин А.В., Дехнич В.С., Еременко Е.А., Колдобская Н.А., Прусихин О.Е., Сафронов С.Г. Интегральная оценка антропогенного воздействия на Байкальскую природной территории: методические подходы и типология муниципальных районов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 3. С. 1–18.
- Бакуменко Л.П., Коротков П.А. Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл) // Прикладная эконометрика. 2008. № 1 (9). С. 73–91.
- Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Лопатина Д.Н., Янчук М.С. Экологическое состояние побережья Малого моря и его влияние на загрязнение озера Байкал // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 66–74.
- Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие. 2009. № 4. С. 146–165.
- Еременко Е.А., Беляев Ю.Р., Болысов 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.
<https://doi.org/10.31857/S043542812101003X>
- Зиновьева И.Г. и др. Вторая очередь мероприятий по ликвидации экологических последствий деятельности Джидинского вольфрамо-молибденового комбината в Закаменском районе Республики Бурятия: Предпроектные исследования. Научно-технический отчет. Чита: ООО “Гидроспецстрой”, 2011. 213 с.
- Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. Т. 444. 272 с.
- Лебедева Е.В., Михалёв Д.В., Шварев С.В. Напряженность геоморфологических обстановок центрального сектора горной системы Анд // Геоморфология. 2015. № 2. С. 77–88.
- Лебедева Е.В., Шварев С.В., Готванский В.И. Природно-обусловленная напряженность геоморфологических процессов территории Дальнего Востока России // Геоморфология. 2014. № 4. С. 48–59.
- Рафаэлевич А.М.Д., Дмитриев В.В. Интегральная оценка экологического благополучия речных систем // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 2. С. 162–184.
- Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал. Отчет о научно-исследовательской работе. М.: МГУ, 2022. 900 с.
- Смирнова О.К., Плюсин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: Изд-во Бурятского науч. центра СО РАН, 2013. 181 с.
- Сычева Д.Г., Кошелева Н.Е. Накопление металлов и металлоидов в почвах и их фракции РМ10 в г. Улан-Удэ // Машиностроение: сетевой электронный науч. журн. 2024. Т. 11. № 1. С. 3–10.
- Цыленков А.С., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л. Водная эрозия почв в бассейнах крупнейших рек Сибири // Изв. РГО. 2022. Т. 154. № 5–6. С. 86–111.
- Чалов Р.С., Чернов А.В. Районирование территории России по экологическому состоянию речных русел и пойм / Проблемы оценки экологической напряженности территории России: факторы, районирование. М., 1993. С. 66–72.
- Чалов С.Р., Школьный Д.И., Промахова Е.В., Леман В.Н., Романченко А.О. Формирование стока наносов в районах открытых разработок россыпных месторождений // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 22–30.

- Эколого-географический атлас-монография Селенга-Байкал / ред. Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, М.Ю. Лычагин, С.Р. Чалов. М.: Географический ф-тет МГУ, 2018. 288 с.
- Alonso H.A., Lamata M.T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach // *Int. J. of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2006. Vol. 14. № 4. P. 445–459.
- Birkmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications // *Environ. Hazards*. 2007. Vol. 7. P. 20–31.
- Bityukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Environmental Portrait of Russian Cities // *J. Ecology and Industry of Russia*. 2010. Vol. 4. P. 6–18.
- Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // *Catena*. 2023. Vol. 230. Art. 107212. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107212>
- Egusa T., Kumagai T., Oda T., Gomi T., Ohte N. Contrasting patterns in the decrease of spatial variability with increasing catchment area between stream discharge and water chemistry // *Water Resources Res.* 2019. Vol. 55. P. 7419–7435. <https://doi.org/10.1029/2018WR024302>
- Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace Elements in River Waters // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 2003. Vol. 5. P. 225–272.
- Haregeweyn N., Tsunekawa A., Poesen J., Tsubo M., Meshesha D.T., Fenta A.A., Nyssen J., Adgo E. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River // *Sci. of The Total Environ.* 2017. Vol. 574. P. 95–108.
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. № 2. P. 024016.
- Jarsjö J., Chalov S., Pietroni J., Alekseenko A., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion, and river loading of metals in a gold mining region of Northern Mongolia // *Reg. Environ. Change*. 2017. Vol. 17. № 7. P. 1991–2005. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1169-6>
- Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Kosheleva N., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River water quality of the Selenga-Baikal basin: Part i — spatio-temporal patterns of dissolved and suspended metals // *Water*. 2020a. Vol. 12. № 8. Art. 2137. <https://doi.org/10.3390/w12082137>
- Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River water quality of the Selenga-Baikal basin: part ii — metal partitioning under different hydroclimatic conditions // *Water*. 2020b. Vol. 12. № 9. Art. 2392. <https://doi.org/10.3390/w12092392>
- Lychagin M., Chalov S., Kasimov N., Shinkareva G., Jarsjö J., Thorslund J. Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system // *Environ. Earth Sci.* 2017. Vol. 76. Art. 1. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6304-z>
- Pietroni J., Chalov S.R., Chalova A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin // *Catena*. 2017. Vol. 152. P. 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.008>
- 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. P. 251–318.
- Teng J., Penton D.J., Ticehurst C., Sengupta A., Freebairn A., Marvanek S., Vaze J., Gibbs M., Streeton N., Karim F., Morton S. A comprehensive assessment of floodwater depth estimation models in semi-arid regions // *Water Resources Res.* 2022. Vol. 58. № 11. Art. e2022WR032031.
- The Green City Index. A research project conducted by the Economist Intelligence Unit, sponsored by Siemens. Munich: Siemens AG Corporate Communications and Government Affairs, 2022. 25 p.
- Thorslund J., Jarsjö J., Wällstedt T., Mörtz C., Lychagin M., Chalov S. 2016, Speciation and hydrological transport of metals in non-acidic river systems of the Lake Baikal basin: Field data and model predictions // *Reg. Environ. Change*. 2017. Vol. 17. P. 2007–2021. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0982-7>
- Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407. P. 853–868.
- Villa F., McLeod H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: guidelines and applications // *Environ. Manage.* 2002. Vol. 29. P. 335–348.

Assessment of Anthropogenic Impact in Municipalities of the Baikal Natural Territory and Its Role in the Entry of Pollutants with River Runoff into Lake Baikal

V. R. Bityukova^{a, *}, S. R. Chalov^{a, **}, E. V. Antonov^{a, b, ***}, Y. R. Belyaev^{a, ***}, S. I. Bolysov^{a, *****},
A. V. Bredikhin^{a, *****}, V. Yu. Grigoriev^{a, *****}, O. E. Prusikhin^{a, *****},
M. Yu. Lychagin^{a, *****}, and A. S. Tsyplenkov^{a, *****}

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

** e-mail: hydroserg@mail.ru

***e-mail: antonovmtg@inbox.ru

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

*****e-mail: sibol@mail.ru

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

*****e-mail: vadim308g@mail.ru

*****e-mail: olegprus2000@mail.ru

*****e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

*****e-mail: atsyplenkov@gmail.com

The discrepancy between the boundaries of river basins, within which pollutants are transported by water flows, and the administrative (municipal) districts where their sources of entry into rivers are located, is a complex scientific and methodological problem of water resources management. The article presents an integrated assessment of anthropogenic impact calculated using state statistics for municipalities of the Baikal natural territory. Using the example of river basins—tributaries of Lake Baikal located within its boundaries—the authors discuss the proposed methodology for assessing the contribution of municipalities to the inflow of heavy metals and metalloids (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Mo, P, Sb, Sn, U) in dissolved and suspended form with river flow into Lake Baikal. The methods of regression analysis have determined the leading role of 5 impact factors statistically influencing the formation of concentrations and flows of priority pollutants in the closing channels of 13 major tributaries of Lake Baikal (Selenga, Barguzin, Turka, Tyva, Verkhnyaya Angara, Snezhnaya, Kicher, Goloustnaya, Buguldeika, Utulik, Kika, Frolikha, Bolshaya Cheremshana rivers). These include: the volume of wastewater discharge; the volume of untreated wastewater discharge; areas disturbed by mining activities; the geomorphological hazards of the territory; the rate of potential soil erosion. Taking into account individual municipalities located within river basins in the formation of the total impact for each of the five factors allowed us to justify a method for determining the quantitative role of municipalities in the formation of the flow of pollutants. Within the boundaries of the Baikal natural territory, the level of anthropogenic impact by most indicators shows a slight downward trend with an increase in the localization of pollution in three urban agglomerations (from 10 to 30% for each of the substances in the Ulan-Ude urban okrug, Severobaikalsky and Selenginsky municipal districts). This zone is characterized by the highest wastewater load in relation to the volume of surface water.

Keywords: pollution, river runoff, anthropogenic impact, basin approach, municipalities, Baikal natural territory

REFERENCES

- Abalakov A.D., Bazarova N.B. Cartographic assessment of the impact of the mining industry on the environment in the Lake Baikal basin. *Geogr. Prir. Resur.*, 2015, no. 3, pp. 64–73. (In Russ.).
- Alonso H.A., Lamata M.T. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach. *Int. J. Uncert. Fuzziness Knowl.-Based Sys.*, 2006, vol. 14, no. 4, pp. 445–459.
- Antonov E.V., Belyaev Yu.R., Bityukova V.R., Bredikhin A.V., Dekhnich V.S., Eremenko E.A., Koldoskaya N.A., Prusikhin O.E., Safronov S.G., Kasimov N. S. Integral assessment of anthropogenic impact on the Baikal Natural Territory: Methodological approaches and typology of municipal districts. *Reg. Res. Russ.*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 316–330.
- Bakumenko L.P., Korotkov P.A., Integral assessment of the quality and degree of environmental sustainability of the region's environment (on the example of the Republic of Mari El). *Prikladn. Ekonometr.*, 2008, no. 1, pp. 73–91. (In Russ.).

- Belozertseva I.A., Vorobyova I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Yanchuk M.S. The ecological state of the coast of the Small Sea and its impact on pollution of Lake Baikal. *Teor. Prikladn. Ekonometr.*, 2021, no. 2, pp. 66–74. (In Russ.).
- Birkmann J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environ. Hazards*, 2007, vol. 7, pp. 20–31.
- Bitukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Environmental portrait of Russian cities. *Ecol. Ind. Russ.*, 2010, vol. 4, pp. 6–18.
- Chalov R.S., Chernov A.V. Zoning of the territory of Russia according to the ecological state of riverbeds and floodplains. In *Problemy otsenki ekologicheskoi napryazhennosti territorii Rossii: faktory, raionirovanie* [Problems of Assessing the Ecological Tension of the Territory of Russia: Factors, Zoning]. Moscow, 1993, pp. 66–72. (In Russ.).
- Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget. *Catena*, 2023, vol. 230, art. 107212.
- Chalov S.R., Shkol'nyi D.I., Promakhova E.V., Leman V.N., Romanchenko A.O. Formation of the sediment yield in areas of mining of placer deposits. *Geogr. Nat. Resour.*, 2015, vol. 36, pp. 124–131.
- Dmitriev V.V. Definition of an integral indicator of the state of a natural object as a complex system. *Obshch. Sreda. Razv.*, 2009, no. 4, pp. 146–165. (In Russ.).
- Ekologo-geograficheskii atlas-monografiya Selenga-Baikal* [Ecological and Geographical Atlas-Monograph of Selenga-Baikal]. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Eds. Moscow: Geograf. Fakul. MGU, 2018. 288 p.
- Egusa T., Kumagai T., Oda T., Gomi T., Ohte N. Contrasting patterns in the decrease of spatial variability with increasing catchment area between stream discharge and water chemistry. *Water Resour. Res.*, 2019, vol. 55, no. 8, pp. 7419–7435.
- Eremenko E.A., Belyaev Yu.R., Bolysov S.I., Myslivets V.I., Bredikhin A.V. A new approach to the integrated assessment of relief for the purposes of effective nature management. *Geomorfolog.*, 2021, vol. 52, no. 1, pp. 19–32. (In Russ.).
- Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters. *Treat. Geochem.*, 2003, vol. 5, pp. 225–272.
- Haregeweyn N., Tsunekawa A., Poesen J., Tsubo M., Meshesha D.T., Fenta A.A., Nyssen J., Adgo E. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 574, pp. 95–108.
- Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17, no. 2, art. 024016.
- Jarsjö J., Chalov S., Pietroni J., Alekseenko A., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion, and river loading of metals in a gold mining region of Northern Mongolia. *Reg. Environ. Change*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 1991–2005.
- Karaushev A.V. *Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov. T. 444* [Theory and Methods of Calculating River Sediments. Vol. 444]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 272 p.
- Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Kosheleva N., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River water quality of the Selenga-Baikal basin: Part I – spatio-temporal patterns of dissolved and suspended metals. *Water*, 2020a, vol. 12, no. 8, art. 2137.
- Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River water quality of the Selenga-Baikal basin: Part II – metal partitioning under different hydroclimatic conditions. *Water*, 2020b, vol. 12, no. 9, art. 2392.
- Lebedeva E.V., Shvarev S.V., Gotvansky V.I. The natural tension of geomorphological processes in the territory of the Russian Far East. *Geomorfolog.*, no. 4, 2014, pp. 48–59. (In Russ.).
- Lebedeva E.V., Mikhalev D.V., Shvarev S.V. The intensity of geomorphological conditions in the central sector of the Andes Mountain system. *Geomorfolog.*, 2015, no. 2, pp. 77–88. (In Russ.).
- Lychagin M., Chalov S., Kasimov N., Shinkareva G., Jarsjö J., Thorslund J. Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system. *Environ. Earth Sci.*, 2017, vol. 76, art. 1.
- Pietroni J., Chalov S.R., Chalova, A.S., Alekseenko A.V., Jarsjö J. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin. *Catena*, 2017, vol. 152, pp. 82–93.
- Rafaelevich A.M.D., Dmitriev V.V. Integrated assessment of ecological well-being of river systems. *Vestn. S.-Peterb. Univ. Nauki Zemle*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 162–184. (In Russ.).
- Razrabotka integrirovannoi (integral'noi) otsenki antropogennogo vozdeistviya i sostoyaniya okruzhayushchei sredy ozera Baikal. Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote* [Development of an Integrated Assessment of Anthropogenic Impact and the State of the Environment of Lake Baikal. Report on Research Work]. Moscow: MGU, 2022. 900 p.
- 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, no. 2, pp. 251–318.
- Smirnova O.K., Plyusnin A.M. *Dzhidinskii rudnyi raion (problemy sostoyaniya okruzhayushchei sredy)* [Dzhidinsky Ore District (Environmental Problems)]. Ulan-Ude: BNTs SO RAN, 2013. 181 p.

- Sycheva D.G., Kosheleva N.E. Accumulation of metals and metalloids in soils and their fractions RM10 in Ulan-Ude. *Mashinostr. Elektron. Nauch. Zh.*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 3–10.
- Teng J., Penton D.J., Ticehurst C., Sengupta A., Freebairn A., Marvanek S., Vaze J., Gibbs M., Streeton N., Karim F., Morton S. A comprehensive assessment of floodwater depth estimation models in semi-arid regions. *Water Resour. Res.*, 2022, vol. 58, no. 11, art. e2022WR032031.
- The Green City Index*. A research project conducted by the Economist Intelligence Unit, sponsored by Siemens. Minich: Siemens AG Corporate Communications and Government Affairs, 2022. 25 p.
- Thorslund J., Jarsjö J., Wällstedt T., Mörtz C., Lychagin M., Chalov S. Speciation and hydrological transport of metals in non-acidic river systems of the Lake Baikal basin: Field data and model predictions. *Reg. Environ. Change*, 2017, vol. 17, pp. 2007–2021.
- Tsyplenkov A.S., Chalov S.R., Shinkareva G.L. Water erosion of soils in the basins of the largest rivers of Siberia. *Izv. RGO*, 2022, no. 5–6, pp. 86–111. (In Russ.).
- Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database. *Sci. Total Environ.*, 2009, vol. 407, pp. 853–868.
- Villa F., McLeod H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: guidelines and applications. *Environ. Manag.*, 2002, vol. 29, pp. 335–348.
- Zinov'eva I.G., et al. *Vtoraya ochered' meropriyatii po likvidatsii ekologicheskikh posledstviy deyatelnosti Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata v Zakamenskom raione Respubliki Buryatiya: Predproektnye issledovaniya. Nauchno-tehnicheskii otchet* [The Second Stage of Measures to Eliminate the Environmental Consequences of the Activities of the Dzhida Tungsten-Molybdenum Combine in the Zakamensk District of the Republic of Buryatia: Pre-project Studies. Scientific and Technical Report]. Chita: Gidrospektro, 2011. 213 p.