

УДК 504.53

ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ Р. МОДОНКУЛЬ ПО КОМБИНАТОРНОМУ ИНДЕКСУ ЗАГРЯЗНЕНИЯ¹

© 2024 г. З. И. Хажеева^a, *, А. М. Плюснин^a, Б. В. Дампилова^a^aГеологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: zina.zkhazh@mail.ru

Поступила в редакцию 01.01.2023 г.

После доработки 20.12.2023 г.

Принята к публикации 22.02.2024 г.

Рассмотрено качество воды р. Модонкуль, протекающей по территории с предприятиями горнодобывающей промышленности. Анализируемые данные характеризуют период 2019–2021 гг. При оценке загрязнения или параметризации качества воды использована методика расчета универсального комбинаторного индекса загрязненности воды. В верховье р. Модонкуль вода по химическому составу гидрокарбонатная кальциевого типа. В зоне смешения речной и рудничных вод происходит изменение химического состава на сульфатный, преимущественно натриево-кальций-магниевый тип. Общая закономерность поведения микроэлементов в воде Модонкуль — увеличение их концентрации с ростом минерализации. Вниз по течению реки содержания тяжелых металлов возрастают: Cu, Zn, Pb в 1.1–1.4, Mn, Co, As — в 6.6–11, Cd — 8 раз. В верховье реки вода оценена по качеству как “слабо загрязненная” 2-го класса. Вниз по течению вода характеризуется как “грязная” 4-го класса с понижением разряда от “а” до “б”.

Ключевые слова: качество воды, комбинаторный индекс, загрязнение реки.

DOI: 10.31857/S0321059624040092 **EDN:** APGIZE

ВВЕДЕНИЕ

Изменение природного химического состава воды реки, ухудшение качества и потребительских свойств происходят в результате техногенного загрязнения. Влияние горнодобывающих и обогащательных предприятий на окружающую среду связано с комплексным составом руд эксплуатируемых месторождений. Массивы техногенных песков — отходов обогащательного производства, а также рудничные воды становятся основными источниками загрязнения рек тяжелыми металлами и другими токсичными элементами [4, 12, 13, 17, 31, 34].

Индексы качества воды — полезные инструменты, используемые для оценки качества воды. Они используются с 1965 г., когда Хортон разработал первую форму качества воды [27]. Цель показате-

лей качества состоит в том, чтобы свести данные большого количества физических, химических и биологических измерений к единому значению, отражающему экологическое состояние конкретного водотока [25, 32, 43, 44]. Общий алгоритм расчета индексов качества воды заключается в приведении всех значений параметров к единой шкале (субиндексы) и в последующем их агрегировании в одно итоговое значение (индекс) [40]. Оценка загрязнения поверхностных водных объектов выполняется, как правило, на основе сравнения фактических концентраций химических веществ с установленными нормативами их предельно допустимой концентрации (ПДК) в воде [11]. Методы оценки загрязнения водных объектов базируются на гидрологических, гидрохимических и гидробиологических данных, полученных с помощью системы мониторинга. Оценка загрязнения включает процедуру параметризации характеристик качества воды — установление и обоснование диапазонов изменения параметров качества воды, соответствующих большей или меньшей безопасности для населения и хозяйства, а также водных биоценозов [21, 23, 25, 29, 36, 37].

¹ Исследование проведено в рамках государственного задания ГИН СО РАН (проект АААА-А21-121011890033-1). Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования и “Аналитического центра минералого-геохимических и изотопных исследований” ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

Джидинское рудное поле, расположенное в Закаменском районе Бурятии (Западное Забайкалье), характеризуется высокой концентрацией оруденения на небольшой территории. Рудная минерализация связана с юрской полифазной гуджирской интрузией, представленной на поверхности многочисленными дайками кислого состава и первомайским штоком гранит–порфиров [3, 6]. Руды Джидинских месторождений комплексные. Это месторождение включает в себя коренные промышленные месторождения: Холтосонское вольфрамовое жильное, Инкурское штокверковое вольфрамовое, Первомайское штокверковое молибденовое [12, 19]. Руды Инкурского и Холтосонского месторождений близки по минеральному составу, но различаются по содержанию полезных компонентов. Кроме основного их компонента WO_3 (0.14–0.7%), содержатся (%): 0.02–0.56 Pb, 0.04–0.38 Zn, 0.03–0.17 Cu, 0.003–0.01 Bi, 0.02–0.05 Be, 4.2–7.6 F, до 175 г/т Ag, до 4 г/т Au. Руды Первомайского штокверка, помимо главного компонента Mo (0.1–0.15%), содержали в среднем (%): 0.018 BeO, 0.031 WO_3 , 0.024 Cu, 0.038 Zn, 0.04 Pb [12]. Компоненты руд в несколько меньших концентрациях присутствуют в отвалах вскрышных пород и забалансовых руд. Они активно участвуют в процессах миграции и концентрирования на геохимических барьерах окружающей территории [34, 40, 42, 43].

Сформированная природно-техногенная система занимает площадь >100 км². В нее входят промплощадки рудников Первомайского, Инкурского, Холтосонского, обогатительных фабрик и хвостохранилищ Джидинского вольфрамомолибденового комбината, разведочные штольни, из которых изливаются рудничные воды, завод по литью металла (ООО “Литейщик”), городские очистные сооружения, автотранспортное предприятие, селитебная зона г. Закаменска с приусадебными и дачными участками. Перечисленные объекты располагаются в бассейне р. Модонкуль.

Рассматриваемая территория расположена в южной части Монголо-Сибирского горного пояса и приурочена к Селенгино-Витимской зоне линейного коробления, морфоструктуре второго порядка мезозойского заложения с уме-

ренной неотектонической активизацией недр. Рельеф территории долинный (абсолютные отметки 1040–1100 м), низкогорный (до 1400 м), в ближайших окрестностях среднегорный (1700–1800 м), относится к системе отрогов Джидинского хребта [16].

Долина р. Модонкуль имеет симметричный корытообразный поперечный профиль с максимальной шириной в устье 1300 м. Расход воды в реке зависит от сезона года, зимой он составляет 0.12–0.18 м³/с, в период открытого русла изменяется в интервале 0.7–3.2 м³/с. Модонкуль характеризуется следующими гидрологическими параметрами: длина реки $L = 20$ км, площадь водосбора $S_{\text{вдсб}} = 170$ км², среднегодовой расход воды $Q = 0.80$ м³/с, годовой сток воды $W = 0.025$ км³ [9].

Ранее в работах [14, 30] приведены результаты исследования химического состава воды р. Модонкуль. Из различных типов загрязняющих веществ тяжелые металлы, даже в низких концентрациях, все чаще вызывают проблемы со здоровьем из-за их опасной способности к биоаккумуляции в пищевых цепях [37, 45]. Цель настоящей работы – оценка качества воды реки по комбинаторному индексу загрязненности, что позволит использовать комплексный метод, учитывающий одновременно всю совокупность загрязняющих веществ.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб воды проводился в течение года в период 2019–2021 гг. Створы отбора проб воды представлены на рис. 1, их перечень и места расположения сведены в табл. 1.

Пробы воды отбирали на расстоянии 1.5–2 м от берега с глубины 0.3–0.6 м. На месте отбора проб определяли температуру, электропроводность, pH воды, содержание растворенного кислорода и TDS. В период исследований на всех створах наблюдения содержание растворенного кислорода в воде изменялось в пределах 7.16–9.38 мг/л. Воду для анализа макрокомпонентов отбирали в пластиковые бутылки объемом 1.5 л. Пробы воды на микроэлементы отбирали в полиэтиленовые контейнеры 15 мл, предвари-

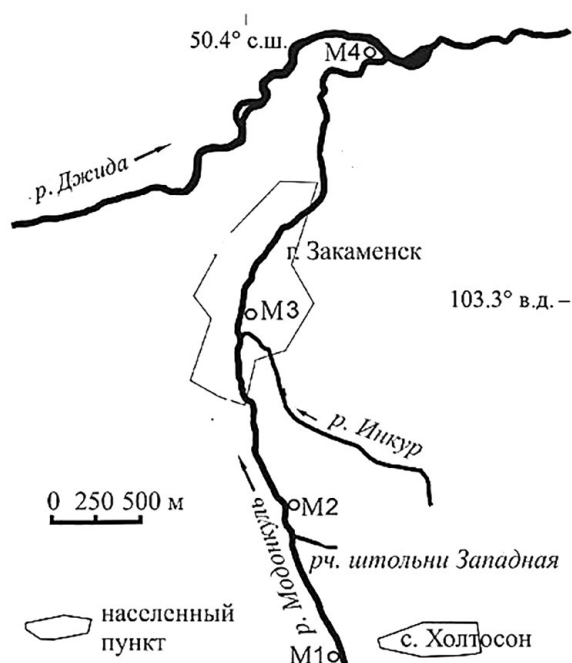


Рис. 1. Картограмма расположения створов отбора проб воды.

Таблица 1. Створы отбора проб и место их расположения

Створ	Место расположения
М1	с. Холтосон, верховье
М2	Ниже впадения ручья из штольни Западная
М3	Выше г. Закаменска
М4	Устье реки

тельно обработанные в лаборатории HNO_3 0.1N и промытые деионизированной водой. Водные пробы для анализа были фильтрованы через “синюю ленту”.

Для изучения химического состава выполнены аналитические работы с определением макрокомпонентов: основных анионов — HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , основных катионов — Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ; химического потребления кислорода ХПК, содержания легкоокисляемых органических веществ БПК₅, кремнекислоты; соединения азота — NO_2^{-1} . Общий набор показателей качества воды включает макроэлементный состав и перечень специфических загрязняющих элементов, для которых приведены ПДК в СанПиН 1.2.3685-21 [11]. Анализ макрокомпонентного состава воды выполнен в сертифицированной лаборатории Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам для

пресных вод [5]. Катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) определяли методами атомной абсорбции; F^- , SiO_2 — колориметрическим; HCO_3^- ; Cl^- — титриметрическим; SO_4^{2-} — турбидиметрическим методами. Определение микроэлементного состава воды выполнено стандартными методами атомно-эмиссионного спектрального анализа на многоканальном анализаторе атомно-эмиссионных спектров “Optima 2000 DV” и атомно-абсорбционного анализа на приборе “AAC PinAAcle 900F” (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ).

При обработке и обобщении информации о химическом составе воды р. Модонкуль использованы методы статистического анализа [20, 21]. Порядок расчета и комплексной оценки и классификацию загрязненности и качества поверхностных вод проводили в соответствии с установленными методическим указаниям РД 52.24.643-2002 [8]. Фактические концентрации химических элементов в воде сравнивались с установленными нормативами их ПДК для водоемов питьевого и хозяйственно-бытового назначения, приведенные в табл. 2. При расчете показателей комплексной оценки и классификации загрязненности воды р. Модонкуль учитывались 15 показателей, приведенные в табл. 2. Коэффициент комплексной загрязненности воды K в каждом створе рассчитывался по формуле $K = N'/N \times 100\%$, где N' — количество нормируемых ингредиентов и показателей качества воды, которые превышают соответствующие ПДК, N — общее количество показателей качества воды, определенных для каждого створа.

Для каждого ингредиента определялись следующие характеристики: α_j — повторяемость случаев превышения ПДК, %; $S\alpha_i$ — частный оценочный балл из Приложения Е в [8]; β_i^* — средняя кратность превышения ПДК; $S\beta_i$ — частный оценочный балл из Приложения Ж в [8]; $S_i = S\alpha_i \times S\beta_i$ — частный оценочный балл для ингредиента по данным на створе наблюдений.

Оценка индексов загрязненности воды на каждом створе проводилась по следующим формулам:

$$S_j = \sum_{i=1}^{N_j} S_i \quad (S_j - \text{комбинаторный индекс за-})$$

Таблица 2. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде [11]

№	Показатели, мг/л	ПДК для водоемов питьевого и хозяйственно-бытового назначения	Класс опасности
1	pH	6.5–8.5	
2	O ₂	<4	
3	Сульфаты SO ₄ ²⁻	500	
4	БПК ₅ (O ₂)	3	
5	ХПК	15	
6	N-NO ₂ ⁻	3.3	2
7	Fe _{общ}	0.3	3
8	F	1.5	2
9	Mn	0.1	3
10	Cu	1	3
11	Cd	0.001	2
12	Zn	5	3
13	Pb	0.01	2
14	Co	0.1	2
15	As	0.01	1

грязненности воды в j -м створе, N_i – число учитываемых ингредиентов в период наблюдения), $S'_j = S_j / N_j$ (S'_j – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды).

При классификации качества воды использован критический показатель загрязненности F , для которого $S_i \geq 9$. Качество воды по степени загрязненности определялось по удельному комбинаторному индексу загрязненности и коэффициенту запаса k , который рассчитывался по формуле $k = 1 - 0.1 \times F$. Классификация качества воды водотоков по комбинаторному индексу загрязненности проведена в соответствии с Приложениями И, К в [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Макрокомпонентный состав воды

Результаты исследования макрокомпонентного состава воды р. Модонкуль приведены в табл. 3, их визуализация – на тройной диаграмме (рис. 2), на которой видно, что фоновые воды обособлены, они характеризуются преобладанием щелочноземельных элементов в катионном составе. В анионном составе воды установлено абсолютное преобладание HCO₃⁻, его относительное содержание достигает 78.5–80 мг-экв.% (створ М1).

В верховье (створ М1) речные воды характеризуются минерализацией 159–204 мг/л (среднее 184.6 мг/л), слабощелочной средой pH 7.2 при вариации 7.0–7.7. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-магниевого. Катионы и анионы в порядке убывания концентраций выстраиваются в следующие ряды: Ca²⁺ ≥ Mg²⁺ > Na⁺+K⁺ и HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻, что характерно для природных речных вод, развитых в пределах магматических пород основного состава (рис. 2).

В анионном составе доминирует гидрокарбонат, его содержание – 102.5–131.2 мг/л (в среднем 109.5 мг/л, в относительных единицах 79.0 мг-экв. %). Содержание сульфат-иона варьирует в пределах 9.8–18.0 мг/л (среднее – 14.8 мг/л, 13.5 мг-экв. %). Концентрация хлорид-иона – в интервале 4.9–6.5 мг/л (среднее 5.91 мг/л, 7.3 мг-экв. %). Среди катионов основные – кальций и магний с содержанием 18.7–23.7 мг/л (среднее 21.4 мг/л, 40.8 мг-экв. %) и 13.2–17.8 мг/л (среднее 15.6 мг/л, 48.8 мг-экв. %) соответственно. Щелочные металлы содержатся в пределах 5.3–7.6 (среднее 6.1 мг/л, 10.1 мг-экв. %). Среднее содержание фтор-ионов F⁻ составляет 2.9 мг/л (табл. 3).

Створ М2 находится ниже впадения ручья, вытекающего из штольни Западной. На

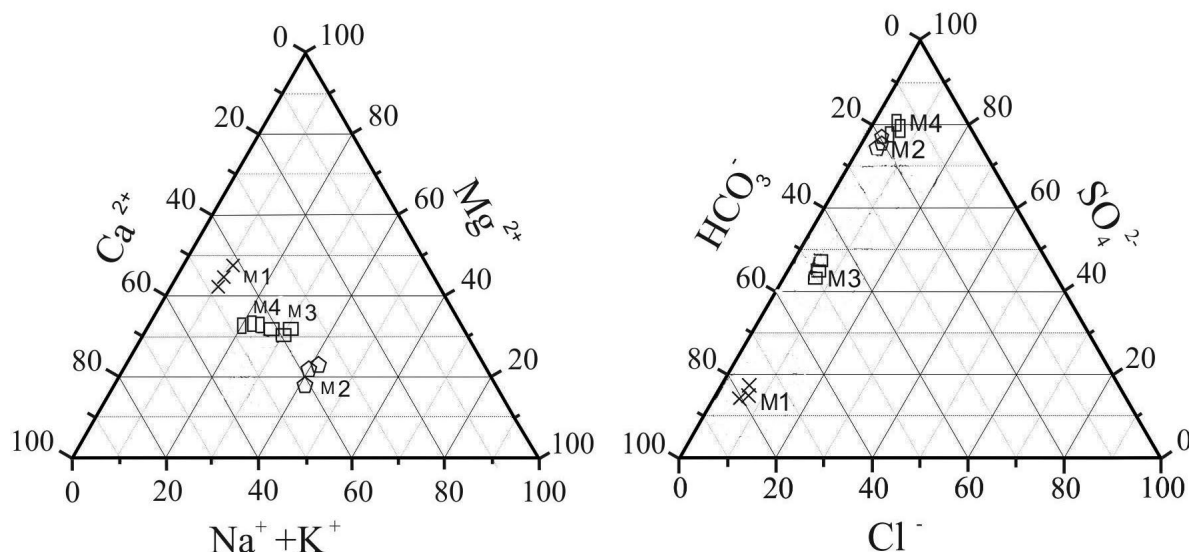


Рис. 2. Треугольная диаграмма катионного и анионного состава воды р. Модонкуль.

этом участке вода р. Модонкуль — результат смешения разных по составу вод: гидрокарбонатной природной речной и сульфатной рудничной воды, вытекающей из штольни Западной. Вода реки на этом участке характеризуется минерализацией 478–597 мг/л, слабокислой средой pH (6.1–6.9). Минерализация воды увеличивается более чем в 3 раза. Содержание гидрокарбонат-иона HCO_3^- варьирует от 75.8 до 89.2 мг/л (долевое содержание 18.1–13.7 мг-экв. %), сульфат-иона SO_4^{2-} — от 167 до 302.6 мг/л (50.7–59.1 мг-экв. %), хлорид-иона Cl^- — от 7.4 до 9.13 мг/л (3.0–2.4 мг-экв. %), фтор-иона F^- — от 36.7 до 50.1 мг/л (28.1–24.7 мг-экв. %), Ca^{2+} — от 68.4 до 84.8 мг/л (51.3–33.9 мг-экв. %), Mg^{2+} — от 21.5 до 35.2 мг/л (26.9–23.5 мг-экв. %), Na^+ — от 32.6 до 121.3 мг/л (21.3–42.2 мг-экв. %). По химическому составу вода сульфатная, натриево-кальцево-магниевого типа. Содержание фторид-иона F^- возрастает в 12–15 раз и варьирует в пределах 36.5–50.1 мг/л. Катионы и анионы в порядке убывания концентраций выстраиваются в следующие ряды: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ и $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$. В анионном составе абсолютные содержания сульфат-иона SO_4^{2-} возрастают почти в 15 раз, гидрокарбонат-иона HCO_3^- — уменьшаются в 1.3 раза. В катионном составе абсолютные содержания натрия Na^+ возрастают в 15 раз, а концентрации катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} возрастают в 1.8–3.6 раза (табл. 3).

Вниз по течению до г. Закаменска река протекает по территории, не затронутой горнодобывающим производством. На створе М3 река дренирует грунтовые воды, формирующиеся на участках распространения аллювиальных отложений. После впадения руч. Инкур в створе М3 химический состав воды становится сульфатным кальцево-натриево-магниевого типа с минерализацией 267–472 мг/л, реакция воды — слабокисло-нейтральной с pH 6.1–7.6. По сравнению с предыдущим створом М2 минерализация воды уменьшается в 1.3 раза, SO_4^{2-} — 1.3, Na^+ — 2.9, Ca^{2+} — 1.5, Mg^{2+} — 1.7, F^- — в 3 раза, а содержание HCO_3^- увеличивается в 1.1 раза.

В устье реки, ниже сброса сточных вод жилищно-коммунального хозяйства г. Закаменска и ниже поступления поверхностного стока с наливного хвостохранилища в створе М4, минерализация возрастает до 638–731 мг/л. Реакция воды становится нейтрально-слабощелочной — pH 7.0–7.9. По химическому составу вода относится к сульфатному, кальцево-магниево-натриевому типу (табл. 3). Катионы и анионы в порядке убывания концентраций выстраиваются в следующие ряды: $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ и $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$. По сравнению с предыдущим створом М3 абсолютные содержания ингредиентов макрокомпонентного состава возрастают в 1.3–2.6 раза,

Таблица 3. Макрокомпонентный состав воды р. Модонкуль в период 2019–2021 гг. (числитель – пределы изменения, знаменатель – среднее)

Компонент	Единицы измерения	Створ			
		М1	М2	М3	М4
pH	Единицы pH	$\frac{7.0-7.7}{7.2}$	$\frac{6.1-6.9}{6.7}$	$\frac{6.1-7.6}{7.2}$	$\frac{7.0-7.9}{7.5}$
HCO ₃ ⁻	мг/л	$\frac{102.5-131.2}{109.5}$	$\frac{75.8-89.2}{77.6}$	$\frac{68.3-93.7}{78.3}$	$\frac{88.3-108.1}{92.4}$
SO ₄ ²⁻	-//-	$\frac{9.8-18.1}{14.8}$	$\frac{167-302.6}{235.6}$	$\frac{102.7-234.6}{186.7}$	$\frac{324.5-367.8}{359.7}$
Cl ⁻	-//-	$\frac{4.9-6.5}{5.9}$	$\frac{7.4-9.1}{8.6}$	$\frac{5.2-7.2}{7.1}$	$\frac{15.7-19.8}{18.6}$
Ca ²⁺	-//-	$\frac{18.7-23.7}{21.4}$	$\frac{68.4-84.8}{75.1}$	$\frac{42.7-62.4}{50.3}$	$\frac{92.3-112.4}{101.3}$
Mg ²⁺	-//-	$\frac{13.2-17.8}{15.6}$	$\frac{21.5-35.2}{28.6}$	$\frac{15.8-20.1}{16.7}$	$\frac{41.6-48.7}{46.7}$
Na ⁺ + K ⁺	-//-	$\frac{5.3-7.6}{6.1}$	$\frac{32.6-121.3}{95.4}$	$\frac{28.4-37.5}{32.4}$	$\frac{52.7-67.2}{61.3}$
F ⁻	-//-	$\frac{2.1-3.3}{2.9}$	$\frac{36.7-50.1}{43.2}$	$\frac{9.8-18.7}{15.2}$	$\frac{15.3-32.7}{27.8}$
TDS	-//-	$\frac{159-204}{184.6}$	$\frac{478-597}{498}$	$\frac{267-472}{372}$	$\frac{638-731}{702}$
Si	-//-	$\frac{2.4-4.2}{3.7}$	$\frac{4.3-5.7}{5.2}$	$\frac{3.6-4.9}{4.3}$	$\frac{4.2-5.9}{5.4}$
NO ₂ ⁻	-//-	$\frac{0.001-0.004}{0.002}$	$\frac{0.009-0.042}{0.027}$	$\frac{0.006-0.027}{0.018}$	$\frac{0.009-0.053}{0.034}$

а их относительные количества остаются близкими к наблюдаемым на створе М2.

Загрязненность воды по комбинаторному индексу загрязнения

В табл. 4 приведены содержания специфических загрязняющих веществ, которые характерны для водных объектов рассматриваемой территории. Эти ингредиенты использованы для оценки загрязненности по комбинаторному индексу. Проведен статистический анализ рядов комплексного загрязнения К (применены теоретически обоснованные статистические характеристики).

Вариационный ряд значений коэффициента К на створе М1 приведен в табл. 4. Для рассматриваемого ряда определены следующие статистические показатели: $K_{\min} = 6.6\%$, $K_{\max} = 26.6\%$, $RK = 20\%$, $K_{cp} = 16.6\%$, $\sigma_k^2 = 52.8$, $\sigma_k = 7.2$, $m_k = 2.09$. Значения К на створе М1 изменялись с вероятностью 99.7% в пределах $16.6 \pm 6.2\%$, а доверительные границы составили от 10.3 до 22.9%. Среднее значение К превышает свою ошибку более чем в 2.6 раза, что дает основание считать ее

достоверной. Химический состав воды на створе М1 подвержен существенным колебаниям в течение периода наблюдения, так как коэффициент ковариации составил 43.6%.

Превышение ПДК в воде на створе М1 наблюдалось по восьми ингредиентам из 15 специфических показателей загрязнения. Число случаев превышения ПДК составили: БПК – 6, ХПК – 5, Fe_{общ} – 7, Рb – 5, Cd – 4, для остальных ингредиентов ≤ 2 . Кратности превышения нормативов ПДК менялись в пределах 1.17–3.0. Наибольшее значение частного оценочного балла ($S_i = 6.99$) характерно для Cd (табл. 5). По F и соединениям Cu, As наблюдался низкий уровень загрязненности воды. Значения частных оценочных баллов для F, Cu, As составили 1.8, 3.5 и 3.9 соответственно. Частные оценочные баллы для БПК, ХПК, соединений Fe и Рb варьировали в пределах 4.1–5.3, что соответствует среднему уровню загрязненности. На этом створе отсутствуют ингредиенты с критическими показателями загрязненности. Величина $S_j = 36.3$, $S_j' = 2.1$ (табл. 6). На створе М1 вода р. Модонкуль характеризуется как “слабо загрязненная” 2-го класса.

На створе М2 вариационный ряд значений К имеет следующие статистические показатели: $K_{\min} = 20\%$, $K_{\max} = 40\%$, $R_K = 20\%$, $K_{\text{ср}} = 30.4\%$, $\sigma_k^2 = 43.4$, $\sigma_k = 6.6$, $m_k = 1.9$. Значения К на створе М2 изменялись с вероятностью 99.7% в пределах $30.4 \pm 5.7\%$, а доверительные границы составили от 24.7 до 36.1%. Среднее значение К превышает свою ошибку в >5.3 раза, что дает основание считать ее достоверной. Размах варьирования К составил 20% (табл. 4), коэффициент ковариации – 21.6%. Уменьшение коэффициента ковариации с 43.6% (створ М1) до 21.6% (створ М2) свидетельствует о снижении колебаний комплексности загрязнения в выборочной совокупности. По сравнению с предыдущим створом коэффициент К возрастает в 1.8 раза.

Превышение ПДК в воде на створе М2 наблюдалось по десяти ингредиентам химического

состава. Число случаев превышения ПДК составили: F – 12, Cu – 8, Mn – 10, БПК – 4, ХПК – 3, Fe_{общ} – 5, Pb – 5, Cd – 6, Co – 3, As – 4. Наибольшее значение кратности превышения ПДК наблюдались для F (28.3), Cd (6.8), As (8.7) (остальные изменялись в пределах 1.1–2.4).

Наибольшее значение частного оценочного балла S_i наблюдалось для содержаний F (14) и Cd (10.4). Значительная загрязненность наблюдалась соединениями Cu, Mn, As и Pb, значения их S_i менялись в пределах 6.1–8.4. Низкий уровень загрязненности характерен для органических веществ, соединений Fe и Co. Значения S_i для них менялись в интервале 2.8–4.5 (табл. 5). На створе М2 ингредиенты с критическими показателями загрязненности, удовлетворяющие условию $S_i \geq 9$, – F и Cd; $S_j = 70.5$, $S'_j = 4.7$. На створе М2 вода реки характеризуется как “грязная” 4-го класса разряда “а”.

Таблица 4. Содержание специфических загрязнителей, мг/л, коэффициент комплексности загрязненности К

Дата	SO ₄ ²⁻	БПК ₅	ХПК	Fe _{общ}	F	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd	Co	As	К, %
Створ М1													
14.03.2019	25.8	3.64	12.6	0.18	0.93	0.07	0.27	0.019	0.007	-	0.011	-	6.6
11.05.2019	32.4	1.37	4.41	0.41	1.22	0.14	2.03	0.015	0.003	-	0.006	-	6.6
15.08.2019	29.3	1.71	16.1	0.36	0.51	0.09	1.2	0.052	0.006	0.002	0.005	-	20.0
06.10.2019	31.7	3.31	10.9	0.29	1.25	0.93	0.08	0.012	0.012	0.001	-	0.005	13.3
12.03.2020	31.2	1.49	18.4	0.48	1.65	1.84	0.63	0.034	0.003	-	-	0.003	13.3
12.05.2020	35.7	5.15	7.07	0.35	0.44	0.85	1.16	0.012	0.015	0.003	0.017	0.008	26.6
17.08.2020	29.8	1.12	19.3	0.39	1.50	0.06	2.08	0.072	0.021	0.001	0.015	0.001	20
10.10.2020	30.4	4.12	8.42	0.28	0.92	0.27	1.23	0.013	0.008	-	0.004	-	6.6
11.03.2021	28.4	3.72	8.19	0.40	0.66	0.16	1.71	0.008	0.006	0.004	-	-	20.0
12.05.2021	26.7	2.19	17.6	0.26	0.52	1.62	0.86	0.052	0.013	0.001	-	0.009	20.2
07.08.2021	34.2	4.12	5.46	0.43	0.68	0.09	0.83	0.021	0.015	-	0.008	0.017	26.6
14.10.2021	36.7	1.63	16.8	0.19	1.11	0.56	0.28	0.038	0.009	0.003	0.005	0.021	20
Створ М2													
14.03.2019	179.2	1.61	15.38	0.29	42.32	2.3	2.8	0.31	0.005	0.003	0.03	0.002	33
11.05.2019	188.4	2.67	5.35	0.26	39.24	1.8	2.47	0.08	0.021	0.012	0.12	-	33
15.08.2019	191	1.38	9.86	0.38	44.52	3.5	0.83	0.26	0.009	-	-	0.005	26.6
06.10.2019	186.2	3.46	13.26	0.26	42.8	0.9	1.28	0.17	0.014	0.005	0.08	0.06	40
12.03.2020	218.2	1.21	18.78	0.42	43.8	2.4	3.7	0.42	0.006	0.001	0.17	0.003	20
12.05.2020	183.4	5.26	8.61	0.18	38.1	0.8	1.59	0.26	0.018	-	0.03	0.02	33
17.08.2020	191.5	2.06	7.74	0.41	45.2	2.7	0.9	0.086	0.007	-	-	0.004	20
10.10.2020	250.2	4.12	10.28	0.19	38.3	3.2	0.6	0.12	0.008	0.007	-	-	33
11.03.2021	207.4	1.19	9.94	0.21	44.26	0.8	2.18	0.28	0.025	0.003	0.07	-	26.6
12.05.2021	182.4	2.24	13.9	0.34	46.27	1.4	1.83	0.16	0.007	-	0.15	0.007	26.6
07.08.2021	228.3	1.72	6.63	0.15	46.3	0.9	4.3	0.34	0.013	0.011	0.04	0.18	33
14.10.2021	194.2	3.46	16.7	0.37	38.4	2.6	0.6	0.17	0.006	-	0.09	0.09	40

Таблица 4. (Окончание)

Год, месяц	SO ₄ ²⁻	БПК ₅	ХПК	Fe _{общ}	F	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd	Co	As	K, %
Створ М3													
14.03.2019	111.2	1.73	16.65	0.174	13.3	0.81	3.4	0.18	0.021	0.003	0.09	0.03	40
11.05.2019	142.3	1.38	5.81	0.257	14.4	1.73	2.32	0.15	0.006	-	0.14	0.06	33
15.08.2019	238.4	2.66	17.6	0.33	10.8	0.92	1.4	0.094	0.018	-	0.05	0.008	20
06.10.2019	224.3	3.51	14.35	0.478	14.5	1.12	0.84	0.18	0.015	0.002	0.08	0.03	46.6
12.03.2020	112.4	3.35	20.35	0.11	15.9	0.73	2.3	0.08	0.007	0.06	0.15	0.009	33
12.05.2020	141.8	5.2	9.29	0.385	11.6	2.3	3.4	0.12	0.005	-	0.008	0.02	40
17.08.2020	160.6	1.13	18.37	0.286	15.4	0.76	1.43	0.18	0.021	0.003	-	0.14	40
10.10.2020	152.9	2.01	11.13	0.53	13.3	0.89	2.14	0.016	0.014	-	0.006	0.02	20
11.03.2021	115.5	1.20	10.76	0.239	12.3	1.24	2.21	0.12	0.012	0.04	0.11	-	40
12.05.2021	167.7	3.76	15.1	0.34	11.8	0.96	1.3	0.14	0.006	-	0.12	-	33
07.08.2021	245.8	2.64	18.1	0.24	12.4	1.3	0.94	0.093	0.018	0.05	0.04	0.18	40
14.10.2021	138.6	3.46	17.66	0.386	13.8	0.78	2.1	0.11	0.015	0.003	-	0.21	40
Створ М4													
14.03.2019	351.8	1.81	17.2	0.82	18.1	0.93	2.34	0.12	0.012	0.07	0.11	0.073	53.3
11.05.2019	345.7	1.41	20.7	0.53	24.2	1.41	1.78	0.24	0.008	0.008	0.06	0.062	46.6
15.08.2019	362.1	1.76	10.1	0.39	25.3	1.12	0.73	0.09	0.004	-	0.15	0.03	33
06.10.2019	348.5	3.43	9.9	0.58	17.3	0.83	0.82	0.11	0.017	0.08	0.09	0.12	46.6
12.03.2020	372.4	1.54	19.1	0.28	26.4	2.32	1.42	0.21	0.021	0.009	0.13	0.14	53.3
12.05.2020	346.1	5.32	7.3	0.11	19.8	1.42	1.75	0.08	0.012	0.008	0.03	0.09	40
17.08.2020	380.1	1.16	21	0.43	27.4	0.83	0.68	0.21	0.009	0.003	0.01	0.15	40
10.10.2020	351.4	2.05	12.8	0.56	25.8	0.93	0.83	0.15	0.007	0.001	-	0.008	20
11.03.2021	364.2	3.84	29.2	0.92	14.6	1.47	2.13	0.27	0.008	0.05	0.04	0.12	53.3
12.05.2021	380.6	1.23	8.7	0.57	26.5	2.62	1.58	0.34	0.009	0.003	0.21	0.007	40
07.08.2021	372.6	1.17	14.6	0.45	27.1	0.82	0.92	0.19	0.012	0.03	0.14	0.18	46.6
14.10.2021	358.4	1.68	16.2	0.52	28.6	1.26	2.41	0.32	0.015	0.003	0.06	0.21	46.6

Для створа М3 вариационный ряд значений К приведен в табл. 4. Для полученного ряда определены следующие статистические показатели: $K_{\min} = 20\%$, $K_{\max} = 46.6\%$, $R_K = 26.6\%$, $K_{\text{ср}} = 35.4\%$, $\sigma_K^2 = 67.6$, $\sigma_K = 8.2$; $m_K = 2.3$. Значения К воды на створе М3 менялись с вероятностью 99.7% в пределах $35.4 \pm 7.1\%$, а доверительные границы составили от 28.3 до 42.6%. Среднее значение К превышает свою ошибку более чем в 4.8 раза, что дает основание считать ее достоверной. Размах варьирования К составил 26.6%, коэффициент ковариации – 23.1%. По сравнению с предыдущим створом значение К увеличилось в 1.1 раза.

Превышение ПДК в воде реки на створе М3 наблюдалось по десяти ингредиентам химического состава воды. Число случаев превышения ПДК составили: F – 12, Cu – 5, Mn – 8, БПК – 5, ХПК – 7, Fe_{общ} – 6, Pb – 8, Cd – 7, Co – 4, As –

8. Наибольшие значения кратности превышения ПДК наблюдались для F (8.8), Cd (23) (остальные изменялись в пределах 1.1–2.8) (табл. 5). Наибольшие загрязнения отмечались для F, Cd и As со значениями S_i 11.2, 12.8 и 11.2 соответственно. Для всех остальных изученных ингредиентов характерен средний уровень загрязненности. Значения S_i для них варьировали в пределах 4.0–6.4 (табл. 5). На рассматриваемом створе ингредиенты с критическими показателями загрязненности – F, Cd и As; $S_j = 70.6$, $S_j' = 4.7$. На створе М3 вода реки характеризуется как “грязная” 4-го класса разряда “б” (табл. 6).

На створе М4 вариационный ряд значений К характеризуется следующими статистическими показателями: $K_{\min} = 20\%$, $K_{\max} = 53.3\%$, $R_K = 33.3\%$, $K_{\text{ср}} = 43.2\%$, $\sigma_K^2 = 93.2$, $\sigma_K = 9.6$, $m_K = 2.78$. Значения К воды на створе М4 менялись с веро-

ятностью 99.7% в пределах $43.2 \pm 8.3\%$, а доверительные границы составили от 34.9 до 51.6%. Среднее значение К превышает свою ошибку более чем в 5.1 раза, что дает основание считать ее достоверной. Размах варьирования К составил 33.3%, коэффициент ковариации — 22.3%, что указывает на сходную величину варьирования химического состава с таковой на створе М2 (табл. 4). По сравнению со створом М3 К увеличился в 1.2 раза.

Превышение ПДК в воде реки на створе М4 наблюдалось по десяти ингредиентам химического состава. Число случаев превышения ПДК составили: F — 12, Cu — 7, Mn — 10, БПК — 3, ХПК — 6, Fe_{общ} — 10, Pb — 6, Cd — 9, Co — 5, As — 10. Наибольшая кратность превышения ПДК

наблюдались для F (15.6), Cd (29.4), As (11.7) (остальные изменялись в пределах 1.3–2.1). Наибольшие загрязнения отмечались по F, соединениям Cd и As со значениями частного оценочного балла 12.4–14. Для остальных ингредиентов, превышающих ПДК, значения S_i варьировали в пределах 3.3–8.4 (табл. 5); $S_j = 80.5$, $S'_j = 5.3$. На створе М4 вода реки характеризуется как “грязная” 4-го класса разряда “б” (табл. 6).

Полученные данные свидетельствует о том, что по мере протекания реки по территории, включающей промплощадки рудников Первомайского, Инкурского, Холтосонского и хвостохранилищ, селитебную зону г. Закаменска с приусадебными и дачными участками, — вода обогащается солями. Средняя минерализация воды реки возрастает

Таблица 5. Исходные данные для расчета комбинаторного индекса загрязнения

Показатель	N'_i	$\alpha_i/S(\alpha_i)$	$\beta^*_i/S(\beta^*_i)$	S_i	N'_i	$\alpha_i/S(\alpha_i)$	$\beta^*_i/S(\beta^*_i)$	S_i
Створ М1					Створ М2			
SO ₄ ²⁻	—	—	—	—	—	—	—	—
БПК ₅	6	50/4.0	1.33/1.3	5.34	4	33/3.3	1.35/1.3	4.29
ХПК	5	41/3.8	1.17/1.1	4.17	3	25/2.4	1.13/1.1	2.64
N-NO ₂ ⁻	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe _{общ}	7	58/4	1.3/1.3	5.2	5	41.3/3.4	1.28/1.3	4.6
F	1	8.3/1.1	1/1.0	1.1	12	100/4	28.3/3.5	14
Cu	2	16/2.1	1.73/1.7	3.6	8	66.6/4	2.48/2.1	8.4
Zn	—	—	—	—	—	—	—	—
Mn	—	—	—	—	10	83.3/4	2.49/2.1	8.4
Pb	5	41/3.4	1.5/1.4	5.3	5	41/3.8	1.82/1.8	6.14
Cd	4	33/3.1	3/2.1	—	6	50/4	6.8/2.6	10.4
Co	—	—	—	—	3	25/2.6	1.46/1.4	3.66
As	2	16.6/2.1	1.9/1.9	4.0	4	33/3.3	8.7/2.8	8.4
Створ М3					Створ М4			
SO ₄ ²⁻	—	—	—	—	—	—	—	—
БПК ₅	5	41.6/3.4	1.28/1.2	4.08	3	25/2.6	1.39/1.3	3.38
ХПК	7	58/4	1.16/1.1	4.4	6	50/4	1.37/1.3	5.2
N-NO ₂ ⁻	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe _{общ}	6	50/4	1.36/1.3	5.2	10	83.3/4	1.92/1.9	7.6
F	12	100/4	8.8/2.8	11.2	12	100/4	15.6/3.1	12.4
Cu	5	41.6/3.4	1.53/1.5	5.1	7	58/4	1.66/1.6	6.4
Zn	—	—	—	—	—	—	—	—
Mn	8	66.6/4	1.47/1.4	5.6	10	83.3/4	2.16/2.1	8.4
Pb	8	66.6/4	1.67/1.6	6.4	6	50/4	1.48/1.4	5.6
Cd	7	58.3/4	23/3.2	12.8	9	75/4	29.4/3.5	14
Co	4	33/3.3	1.3/1.3	4.3	5	41/3.4	1.48/1.4	4.76
As	8	66/4	8.6/2.8	11.2	10	83/4	11.7/3.1	12.4

Таблица 6. Характеристика состояния загрязнения и классификация качества воды

Створ	S_A	S'_A	F	k	Характеристика, класс и разряд
M1	36.3	2.1	—	—	Слабо загрязненная, 2-й класс
M2	70.5	4.7	2	0.8	Грязная, 4-й класс, разряд “а”
M3	70.0	4.6	3	0.7	Грязная, 4-й класс, разряд “б”
M4	80.5	5.4	3	0.7	Грязная, 4-й класс, разряд “б”

с 184.6 (рН 7.2) до 702.0 мг/л (рН 7.5). Химический тип воды меняется от гидрокарбонатного кальциевого до сульфатного, кальций-магний-натриевого. Содержания нитритов NO_2^{-1} не превышали нормативы ПДК. Если в верховье реки вода была оценена как “слабо загрязненная” 2-го класса качества, то вниз по течению она характеризуется как “грязная” 4-го класса с понижением разряда от “а” до “б”.

Ранее в работе [30] была установлена общая закономерность поведения микроэлементов в фильтрованной воде р. Модонкуль. Для большинства из них наблюдается увеличение концентрации с ростом TDS, причем содержания крупноионных литофилов возрастают в 2–4 раза. И только редкоземельные элементы РЗЭ, итрий Y и торий Th проявляют обратную тенденцию. Однако в процессе речного переноса сорбированных или осажденных металлов может значительно меняться концентрация металлов в растворенных формах [15, 17, 33, 39].

В настоящей работе водные пробы для анализа были отфильтрованы через “синюю ленту”. В такой водной пробе содержится преимущественно мелкодисперсная взвесь (<1.2 мкм). Мелкодисперсная взвесь значительно обогащается (в 2–35 раз) большинством элементов в воде под влиянием основного фактора — уменьшение размера частиц взвеси увеличивает площадь поверхностной адсорбции. Основной механизм, с помощью которого металлы и другие химические вещества связываются с почвой и отложениями, может оказывать важное влияние на их геохимическое поведение в воде. Многие микроэлементы переносятся рекой в сложной форме, связанными с водными Fe–Mn-оксидами, адсорбированными на глинистых и органических веществах, карбонатах и сульфидах наносов [18, 22, 24, 26, 28, 42, 43]. Однако в зависимости от геохимических и гидрологических условий про-

цессы и скорости процессов, которые контролируют связывание металлов, могут значительно различаться, а геохимические процессы в этой системе все еще в значительной степени неизвестны.

В воде р. Модонкуль, фильтрованной через “синюю ленту”, поведение микроэлементов меняется при росте минерализации воды. Об этом свидетельствуют графики, приведенные на рис. 3а, 3б. Зависимость содержаний Fe, Pb, Cu от минерализации не столь очевидна, что в основном обусловлено тем, что эти элементы связаны с нерастворимой частью минеральной матрицы пород и из большинства твердых отходов выщелачиваются в незначительных количествах (рис. 3а). С ростом минерализации наибольшая растворимость в воде наблюдается для соединений Mn, Cd, As, Co (рис. 3б). Вниз по течению реки содержания тяжелых металлов Cu, Zn, Pb возрастают в 1.1–1.4 раза, концентрации Mn, Co, As — в 6.6–11 раз, Cd — в 8 раз (табл. 4). Содержания изученных микроэлементов в воде реки меняются по сезонам года, наблюдается тенденция увеличения их в весной и после ливневых дождей: например, наибольшие содержания Cu весной были 2.3–2.6 мг/л, после дождей — 3.5 мг/л.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В верховье р. Модонкуль химический состав воды гидрокарбонатный, кальциево-магниевый типа. Макрокомпонентный состав в порядке убывания концентраций выстраивается в следующие ряды: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$. В зоне смешения речной воды с рудничными водами порядок убывания концентраций меняется на следующий ряд: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$, происходит изменение химического состава на сульфатный преимущественно натриево-кальциево-магни-

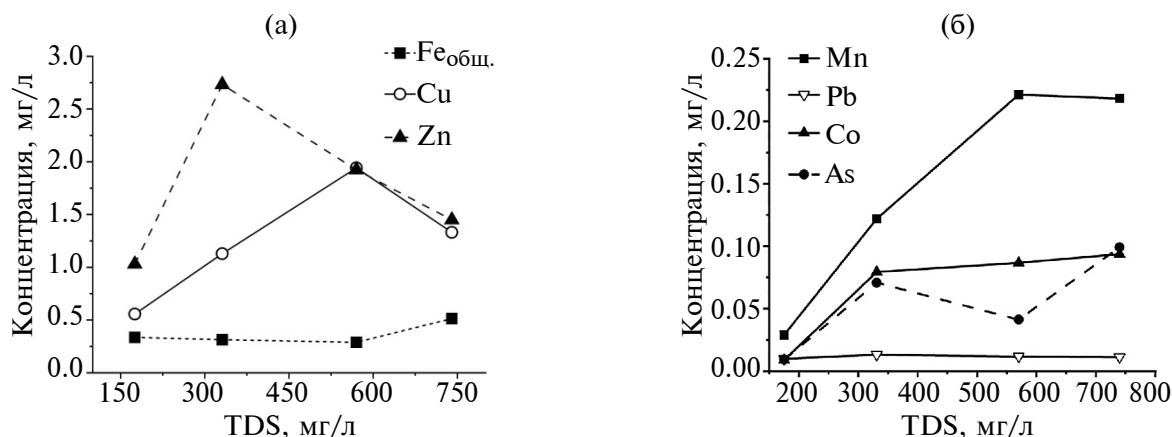


Рис. 3. Распределение металлов Fe, Cu, Zn (а) и Mn, Co, Cd, Pb, As (б) в воде р. Модонкуль.

евого типа. Средняя минерализация воды реки меняется от 184.6 (рН 7.2) до 702.0 мг/л (рН 7.5).

Общая закономерность поведения микроэлементов в воде р. Модонкуль – увеличение их концентрации с ростом минерализации. Вниз по течению реки содержания тяжелых металлов Cu, Zn, Pb возрастают в 1.1–1.4 раза, концентрации Mn, Co, As – в 6.6–11 раза, Cd – в 8 раз. Содержания микроэлементов в воде реки меняются по сезонам года, наблюдается тенденция увеличения их в весну.

Проведенная оценка качества воды р. Модонкуль по степени загрязненности показала, что в верховье реки основными загрязняющими веществами были органические вещества (по БПК₅ и ХПК), соединения Fe, Pb и Cd. Среднее значение коэффициента комплексности загрязнения составило 16.6%, а коэффициент ковариации – 43.6%, что свидетельствует о том, что химический состав воды на створе подвержен существенным колебаниям в течение периода наблюдения. Вода реки на этом участке относится к 2-му классу и характеризуется как “слабо загрязненная”.

В устье реки в зоне смешения природной воды с техногенной ингредиенты с критическими показателями загрязненности – F, Cd и As, для которых частные оценочные баллы $S_i \geq 9$. Средний уровень загрязненности воды характерен для соединений Mn, Fe, Cu, Pb, Co, а также для органических веществ. Среднее значение коэффициента комплексности загрязнения соста-

вило 43.2%, а коэффициент ковариации – 22.3%. На этом участке реки качество воды относится к 4-му классу, характеризуется как “грязная” разряда “б”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Заславская М.Б., Гончаров А.В. Методические подходы к изучению и параметризации качества воды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2016. № 2. С. 13–21.
2. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
3. Гордиенко И.В., Филимонов А.В., Минина О.Р., Горнова М.А., Медведев А.Я., Климук В.С., Елбаев А.Л., Томуртогов О. Джидинская островодужная система палеоазиатского океана: строение и основные этапы геодинамической эволюции в венде-палеозое // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 120–140.
4. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Корляков И.Д., Сорокина О.И., Тимофеев И.В. Экогеохимия городов и промышленных центров в бассейне Селенги // Геохимия ландшафтов. К 100 – летию со дня рождения А.И. Перельмана / Под ред. Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. М.: АПР, 2017. С. 253–294.
5. Контроль качества воды. М.: Стандартинформ, 2010. 944 с.
6. Мац Д.В., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: СО РАН, 2001. 252 с.
7. Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 576 с.

8. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям СПб.: Гидромете-оиздат, 55 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 3. Бассейн оз. Байкал (Забайкалье). Л.: Гидрометеиздат, 1973. 400 с.
10. *Рисник Д.В., Беляев С.Д., Булгаков Н.Г., Левич А.П., Максимов В.Н., Мамихин С.В., Милько Е.С., Фурсова П.В., Ростовцева Е.Л.* Подходы к нормированию качества окружающей среды. Законодательные и научные основы существующих систем экологического нормирования // Успехи современной биологии. 2012. Т.132. № 6. С. 531–550.
11. САНПИН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М.: Роспотребнадзор, 2021. Постановление № 62296.
12. *Смирнова О.К., Плюснин А.М.* Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 181 с.
13. *Тимофеев И.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е.* Геохимия почвенного покрова горнопромышленных ландшафтов на юге-западе Забайкалья (г. Закаменск) // География и природ. ресурсы. 2016. № 3. С. 49–61.
14. *Хажеева З.И.* Химический состав воды р. Модонкуль в современных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 183–187.
15. *Чебыкин Е.П., Сорокикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А.* Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 5. С. 613–631.
16. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2015. 145 с.
17. *Batbayar B., Karthe D., Pfeiffer M., von Tumpling W., Kappas M.* Influence of urban settlement and mining activities on surface water quality in northern Mongolia, Water and environment in the Selenga-Baikal basin // Int. Res. Cooperation Ecoregion Global Relevance / Eds D. Karthe, S. Chalov, N. Kasimov, M. Kappas. Stuttgart: Ibidem, 2015. P. 73–86.
18. *Chalov S., Zavadsky A.S., Belozeroва E.V., Bulacheva M.P., Jarsjo J., Thorslund J., Yamkhin J.* Suspended and dissolved matter fluxes in the upper Selenga River basin // Geogr. Environ. Sustain. 2012. V. 5 (2). P.78–94.
19. *Damdinova L.B., Damdinov B.B., Xiao-Wen Huang, Bryansky N.V., Khybanov V.B., Yudin D.S.* Age, Conditions of Formation and Fluid Composition of the Pervomaiskoe Molybdenum Deposit (Dzhidinskoe Ore Field, South-Western Transbaikalia, Russia) // Minerals. 2019. V. 9. P. 572–592.
20. *Demetriades A., Brike M.* Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting. Brussels // EuroGeoSurveys. 2015. 162 p.
21. *Duan W., He B., Nover D., Yang G., Chen W., Meng H., Zou S., Liu C.* Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang lake basin using multivariate statistical methods // Sustainability. 2016. V. 8. P. 133–162.
22. *Gaillardet J., Viers J., Dupre B.* Trace elements in river waters // Treatise on geochemistry. V. 5. N. Y.: Elsevier Sci., 2003. P. 225–272.
23. *Gitau M.W., Chen J., Ma Z.* Water quality indices as tools for decision making and management // Water Resour. Manag. 2016. V. 30. P. 2591–2610.
24. *Grosbois C., Schaefer J., Bril H., Blanc G., Bossy A.* Deconvolution of trace element (As, Cr, Mo, Th, U) sources and pathways to surface waters of a gold mining-influenced watershed // Sci. Tot. Environ. 2009. V. 407 (6). P. 2063–2076.
25. *Gupta N., Pandey P., Hussain J.* Effect of physicochemical and biological parameters on the quality of river water of Narmada, Madhya Pradesh, India // Water Sci. V. 31. P. 11–23.
26. *Hayzoun H., Garnier C., Durrieu G., Lenoble V., Le Poupon C., Angeletti B., Ouammou A., Mounier S.* Organic carbon, and major and trace element dynamic and fate in a large river subjected to poorly-regulated urban and industrial pressures (Sebou River, Morocco) // Sci Total Environ. 2015. V. 502. P. 296–308.
27. *Horton R.K.* An index number system for rating water quality // Water Pollut. Cont. Fed 1965. V. 37. P. 300–305.
28. *Inam E., Khantotong S., Kim K.W., Tumendemberel B., Erdenetsetseg S., Puntsag T.* Geochemical distribution of trace element concentrations in the vicinity of Boroo gold mine, Selenga Province, Mongolia // Environ. Geochem. Health. 2011. V. 33. № 1. P. 57–69.
29. *Ismail A.H., Robescu D.* Assessment of water quality of the Danube river using water quality indices technique // Environ. Eng. Manag. 2019. V. 18. P. 1727–1737.
30. *Khazheeva Z.I., Plyusnin A.M., Smirnova O.K., Peryazeva E.G., Zhambalova D.I., Doroshkevich S.G., Dabae-*

- va V.V. Mining activities and the chemical composition of R. Modonkul, Transbaikalia // *Water (Switzerland)*. 2020. V.12 (4). C. 979–998.
31. Kosheleva N., Timofeev I., Kasimov N. and Sandag E. Geochemical transformation of soil cover and woody vegetation in the largest industrial and transport center of Northern Mongolia (Darkhan) // *Applied Geochem.* 2019. V. 107. P. 80–90.
32. Lumb A., Sharma T.C., Bibeault J.-F. A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions // *Water Qual. Expo. Health*. 2011. V. 3. P. 11–24.
33. Nadmitov B., Hong S., Kang S.I., Chu J.M., Gomboev B., Janchivdorj L., Lee C.-H., Khim J.S. Large-scale monitoring and assessment of metal contamination in surface water of the Selenga River Basin (2007-2009) // *Environ. Sci. Pollution Res.* 2015. V. 22. № 4. P. 2856–2867.
34. Park H., Fan P., John R., Chen J. Urbanization on the Mongolian plateau after economic reform: Changes and causes // *Applied Geogr.* 2017. V. 333. № 1. P. 124–132.
35. Pfeiffer M., Batbayar G., Hofmann J., Siegfried K., Karthe D., Hahn- Tomer S. Investigating arsenic (As) occurrence and sources in ground, surface, waste and drinking water in northern Mongolia // *Environ. Earth Sci.* 2015. V. 73. P. 649–662.
36. Poonam T., Tanushree B., Sukalyan C. Water quality indices-important tools for water quality assessment. A review. // *Adv. Chem.* 2013. V. 1. P. 15–28.
37. Qiu Y.W. Bioaccumulation of heavy metals both in wild and mariculture food chains in Day Bay, South China // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2015. V. 512. P. 143–153.
38. Radu V.M., Ionescu P., Deak G., Diacu E., Ivanov A.A., Zamfir S., Marcus M.I. Overall assessment of surface water quality in the lower Danube river // *Environ. Monit. Assess.* 2020. V. 192. P. 135–156.
39. Reimann C., de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors // *Sci. Total Environ.* 2005. V. 337. P. 91–107.
40. Sutadian A.D., Muttill N., Yilmaz A.G., Perera B.J.C. Development of river water quality indices. A review // *Environ. Monit. Assess.* 2016. V.188. P. 29–45.
41. Theuring P., Collins A.L., Rode M. Source identification of fine-grained suspended sediment in the Kharaa River basin, northern Mongolia // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 526. P. 77–87.
42. Thorslund J., Jarsjö J., Chalov S.R., Belozherova E.V. Gold mining impact on riverine heavy metal transport in a sparsely monitored region: the upper Lake Baikal basin case // *Environ. Monit.* 2012. V. 14. P. 2780–2792.
43. Tunc Dede O., Telci I.T., Aral M.M. The use of water quality index models for the evaluation of surface water quality: A case study for Kirmir Basin, Ankara, Turkey // *Water Qual. Expo. Health*. 2013. V. 5. P. 41–56.
44. Tyagi S., Sharma B., Singh P., Dobhal R. Water quality assessment in terms of water quality index // *Am. J. Water Resour.* 2013. V. 1. P. 34–38.
45. Volpe M., La Cara F., Volpe F., De Mattia A., Serino V., Petitto F., Zavalloni C., Limone F., Pellecchia R., De Prisco P. Heavy metal uptake in the ecological food chain // *Food Chem.* 2009. V. 117. P. 553–560.