УДК: 911.9:504.054:547.62 **DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-175-188**

Ю.М. Семенов[1], А.В. Силаев[2], М.Ю. Семенов[3]

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ РАСТВОРЕННОГО ВЕЩЕСТВА В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

АННОТАЦИЯ

Разработана методика ГИС-картографирования для выявления и оценки вкладов источников вещества в состав поверхностных вод. Основой для создания базы данных ГИС послужили результаты изучения пространственного разнообразия химического состава поверхностных вод. Геоинформационный анализ включал создание цифровой основы для картографирования, векторизацию картографических источников и материалов дистанционного зондирования Земли, создание единой базы данных, объединяющих картографическую, статистическую информацию и материалы полевых наблюдений, морфометрический анализ рельефа на основе цифровой модели рельефа, создание ландшафтной основы для базовых карт, составление тематических карт, анализ изменения компонентов геосистем, создание электронных картографических слоев, позволяющих идентифицировать участие источников растворенного вещества в формировании состава вод. Анализ изменения компонентов базировался на результатах разновременных исследований состава вод и донных отложений. На базе сопоставления химического состава вод притоков Байкала с химическим и минералогическим составом пород разработан подход к выявлению источников растворенного вещества и оценке их вкладов в формирование макро- и микроэлементного составов поверхностных вод. Для решения задач исследования применялись методы статистического анализа данных, многокомпонентного смешения с использованием систем линейных уравнений, полевые методы сбора данных. Выявлены три основные категории источников растворенного вещества (силикатных, сульфидсодержащих силикатных, карбонатных пород) и рассчитаны их вклады в химический состав вод. На основе микроэлементных трассеров вклады силикатных пород были разделены на вклады первичных и вторичных силикатных пород, выделены рудосодержащие силикатные породы без сульфидов. Путем сопоставления соотношений концентраций микроэлементов в водах незагрязненных территорий и сточных водах предприятий выявлены трассеры, позволившие идентифицировать источники загрязнения поверхностных вод. Составлены карты территорий, обусловливающих определенный химический состав поверхностных вод, впервые классифицированный на основе соотношения величин вкладов дренируемых горных пород.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: картографирование, ГИС, Байкал, поверхностные воды, растворенное вещество, источники

[1] Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: **yumsemenov@mail.ru**

[2] Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: **anton_s@bk.ru**

[3] Лимнологический институт СО РАН, Улан-Баторская, д. 3, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: **smu@mail.ru**

Yury M. Semenov[1], Anton V. Silayev[2], Mikhail Yu. Semenov[3]

CARTOGRAPHIC SUPPORT OF IDENTIFICATION OF NATURAL AND MAN-MADE SOURCES OF DISSOLVED MATTER IN LAKE BAIKAL BASIN

ABSTRACT

A method of GIS mapping was developed to identify and assess the contributions of sources of matter to the composition of surface waters. The basis for the creation of the GIS database was the results of the study of the spatial diversity of the chemical composition of surface waters. Geoinformation analysis included the creation of a digital framework for mapping, vectorization of mapping sources and Earth remote sensing materials, creation of a single database combining cartographic, statistical information and field observation materials, morphometric relief analysis based on a digital relief model, creating a landscape basis for base maps, creating thematic maps, analyzing changes in the components of geosystems, creating electronic cartographic layers allowing to identify participation of solute sources in formation of water composition. The analysis of component changes was based on the results of different-time studies of the composition of water and bottom sediments. Based on the comparison of the chemical composition of the waters of the Baikal tributaries with the chemical and mineralogical composition of rocks, an approach was developed to identify sources of solute and assess their contributions to the formation of macro- and microelement compositions of surface waters. To solve the problems of the study, methods of statistical analysis of data, multicomponent mixing using systems of linear equations, field methods of data collection were used. Three main categories of solute sources (silicate, sulfide-containing silicate, carbonate rocks) were identified and their contributions to the chemical composition of water were calculated. On the basis of microelement tracers, the contributions of silicate rocks were divided into contributions of primary and secondary silicate rocks, ore-containing silicate rocks without sulfides were isolated. By comparing the ratios of concentrations of trace elements in the waters of uncontaminated territories and wastewater of enterprises, tracers were identified that made it possible to identify sources of surface water pollution. Maps of territories that determine a certain chemical composition of surface waters were compiled, which was first classified on the basis of the ratio of the contributions of drained rocks.

KEYWORDS: mapping, GIS, Baikal, surface water, solute, sources

ВВЕДЕНИЕ

Основными задачами комплексной физической географии в формировании региональной экологической политики являются разработка концепции и методической базы выявления ландшафтно-экологических условий дифференциации природопользования, методов использования географической информации для оценки антропогенных нарушений окружающей среды и обоснования способов их компенсации. Поэтому для планирования устойчивого территориального развития необходимо изучить современное состояние компонентов геосистем и выявить механизмы природной динамики и антропогенной трансформации геосистем регионов Сибири. Важную роль в решении этих задач в бассейне оз. Байкал (рис. 1) играют ландшафтно-геохимические и ландшафтно-гидрохимические исследования, направленные на

[1] V.B. Sochava Institute of geography of SB RAS, Ulan-Batorskaya st., 1, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail*: **yumsemenov@mail.ru**
[2] V.B. Sochava Institute of geography of SB RAS, Ulan-Batorskaya st., 1, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail*: **anton_s@bk.ru**
[3] Limnological institute of SB RAS, Ulan-Batorskaya st., 3, 664033, Irkutsk, Russia, *e-mail*: **smu@mail.ru**

выявление источников природного и техногенного вещества и определение их вкладов в состав вещества компонентов геосистем. Их результаты необходимы для оценки возможностей предотвращения и обоснования способов компенсации антропогенных нарушений окружающей среды.

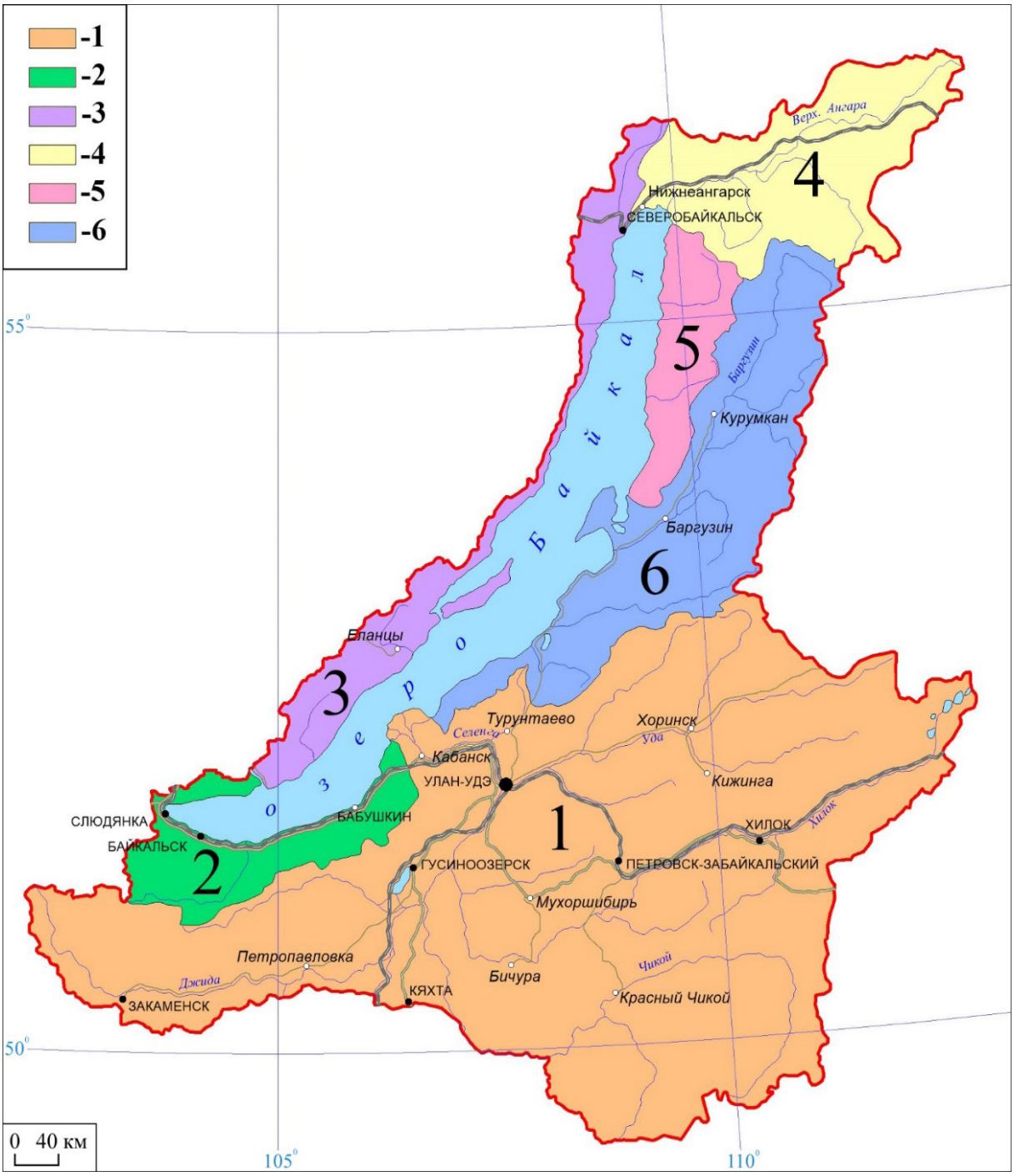

Рис. 1. Бассейны притоков оз. Байкал:
1 — Селенги, 2 — рек юго-западной части озерного бассейна, 3 — рек северо-западной части бассейна, 4 — Верхней Ангары, 5 — Большой и Томпуды, 6 — Баргузина
Fig. 1. Basins of tributaries of Lake Baikal:
1 – Selenga, 2 – rivers of the southwestern part of the lake basin, 3 – rivers of the northwestern part of the basin, 4 – Upper Angara, 5 – Bolshaya and Tompuda, 6 – Barguzin

Основным препятствием на пути решения такого рода задач является дефицит информации о региональных естественных и антропогенных источниках вещества поверхностных вод и атмосферного воздуха. Главная проблема выявления происхождения растворенного вещества в поверхностных водах – недостаток данных о его возможных источниках. Если говорить об источниках загрязняющих веществ, то здесь основным препятствием к познанию их появления и поведения является дефицит данных о составе выбросов конкретных источников загрязнения. Без них идентификация источников невозможна, так как ее суть состоит в сопоставлении соотношений концентраций загрязнителей (трассеров) в выбросах источников с соотношениями этих же загрязнителей в воде.

В настоящей публикации представлены результаты разработки методического аппарата ГИС-картографирования с целью отображения итогов выявления и оценки вкладов источников вещества в состав поверхностных вод. Основой для создания базы данных ГИС послужили результаты изучения пространственного разнообразия химического состава поверхностных вод с использованием подходов, позволяющих получить данные об участии источников в формировании состава вод с применением метода многокомпонентного смешения практически без использования информации о самих этих источниках.

При решении задач исследования применялись методы статистического анализа данных, многокомпонентного смешения с использованием систем линейных уравнений, полевые методы сбора данных. Для обработки пространственных данных и представления результатов исследования в графическом виде широко использовались методы геоинформационного картографирования с привлечением разновременных и разномасштабных данных космических съемок, топографических карт, различных пространственных данных находящимися в открытом доступе. Комплекс анализируемых данных, ориентированных на загрязнение различных компонентов ландшафтной структуры, наряду с блоком пространственных данных о рельефе, гидрографической сети и других элементах природных систем, составляет основу базы данных геоинформационной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пространственные данные, необходимые для формирования информационного обеспечения ГИС, можно разделить на 2 блока: первичные, получаемые в ходе полевых и лабораторных исследований, вторичные – тематические и топографические карты, цифровые модели рельефа, ландшафтной структуры, данные космических съемок различного временного охвата и масштаба и т.п. Сбор и анализ первичных данных о химическом составе вод составили содержание первого этапа исследований.

Фоновыми объектами исследований по выявлению происхождения растворенного вещества в поверхностных водах служили 75 речек и ручьев юго-западного и юго-восточного побережья оз. Байкал (рис. 2). Всего обследовалось 75 водотоков (даты отбора проб: 07-09.05.2018; 10-12.06.2018; 14-16.07.2018; 09-12.05.2019; 11-12.06.2019; 19-21.07.2019; 24-28.08.2019; 31.08-04.09.2019; 22-25.05.2020; 05-06.10.2020; 12-13.10.2020; 14-17.05.2021; 28-30.05.2021; 24-28.06.2021; 16-21.08.2021), но это количество не было постоянным: по крупным водотокам многочисленные повторы не требовались, а мелкие водотоки не всегда обнаруживались (в зависимости от сезона).

Сравнение химических свойств вод разных участков обследованной территории проводилось после усреднения их составов для групп бассейнов отдельных водотоков, выделенных путем анализа и интерпретации картографических материалов на основе ландшафтно-геохимических критериев. При разграничении бассейнов рек и ландшафтно-гидрохимическом районировании использовалось сопоставление пространственно привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS. Выбор фонового участка, помимо отсутствия промышленного загрязнения (рис. 3), обусловлен плохой изученностью химического состава его поверхностных вод, так как до сих пор внимание уделялось исключительно притокам, стекающим со склонов хр. Хамар-Дабан, и главным притокам озера.

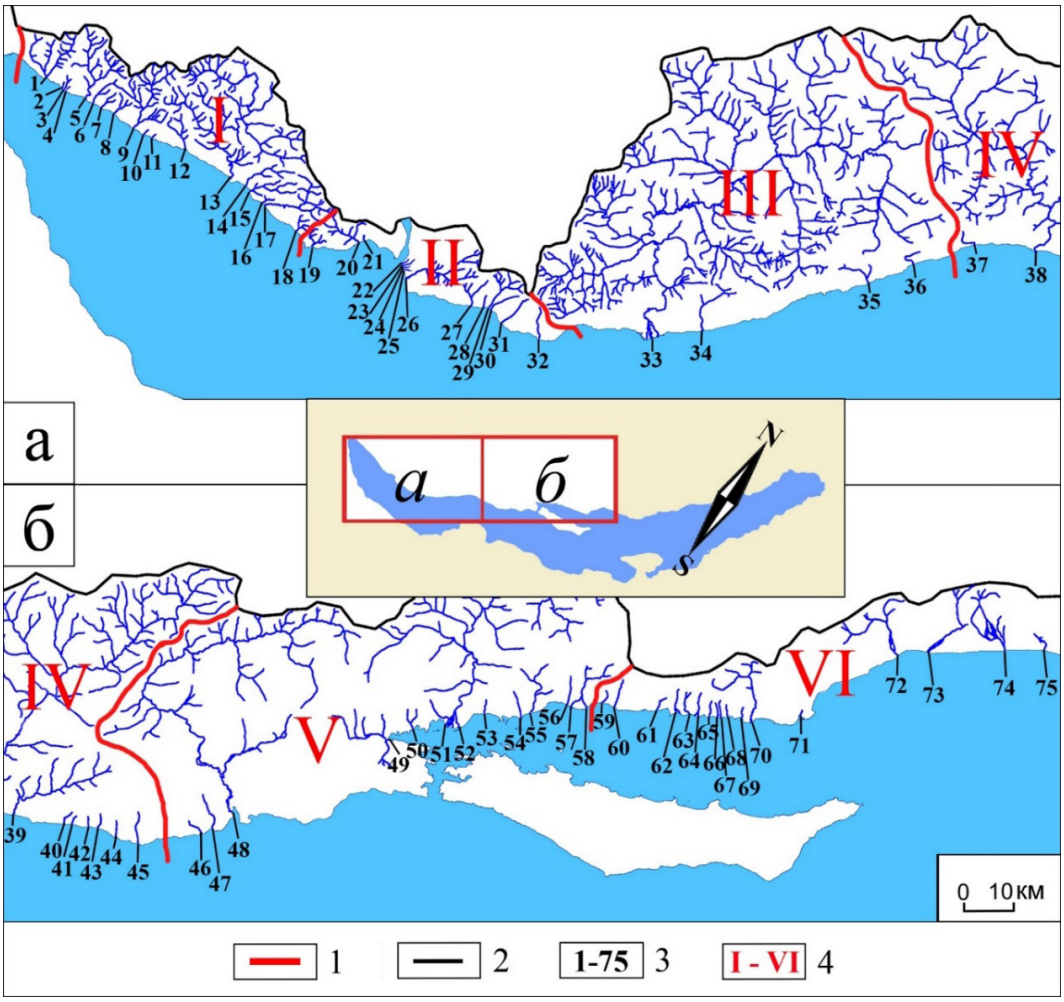

Рис. 2. Местоположение обследованных водотоков. Границы:
1 – бассейна озера Байкал, 2 – ландшафтно-гидрохимических районов; 3 – водотоки;
районы: I – Маритуйский, II - Листвянский, III – Бугульдейский, IV – Голоустненский,
V – Еланцынский, VI – Онгуренский
Fig. 2. Location of surveyed watercourses. Boundaries: 1 – Lake Baikal basin, 2 – landscape and hydrochemical districts; 3 – watercourses; districts: I – Maritusky, II – Listvyansky, III – Buguldeisky, IV – Goloustnensky, V – Elantsynsky, VI – Ongurensky.

В качестве загрязняемого объекта был выбран главный приток Байкала – река Селенга, где воды отбирались на 11 станциях на участке русла от монгольской границы до устья. Всего было проанализировано 88 проб воды (даты отбора: 03-05.08.2018; 28.08-04.09.2018; 09-12.05.2019; 31.08-04.09.2019; 22-25.05.2020; 12-13.10.2020; 14-17.05.2021; 16-21.08.2021).

Основным методом исследования послужил метод многокомпонентного смешения, рассматривающий растворенное в воде вещество в качестве смеси веществ из разных источников [Семенов, 2017; Семенов и др., 2017]. Он основан на предположении, что не коррелирующие между собой компоненты раствора происходят из разных источников, а коррелирующие – из одного. О связи составов вод и источников растворенного вещества судили по близости их точек на диаграммах смешения. Диаграмма представляла собой поле точек проб растворенного вещества вод внутри области смешения, образованной линиями, соединяющими точки источников, в координатах величин отношений-трассеров. Для сопоставления состава вод с составом пород использовался метод многокомпонентного смешения, рассматривающего растворенное в воде вещество в качестве смеси веществ из разных источников. Геологические особенности изученных участков побережья не рассматривались, так как основной задачей работы было выявление источников формирования состава вод озера именно при дефиците информации о них.

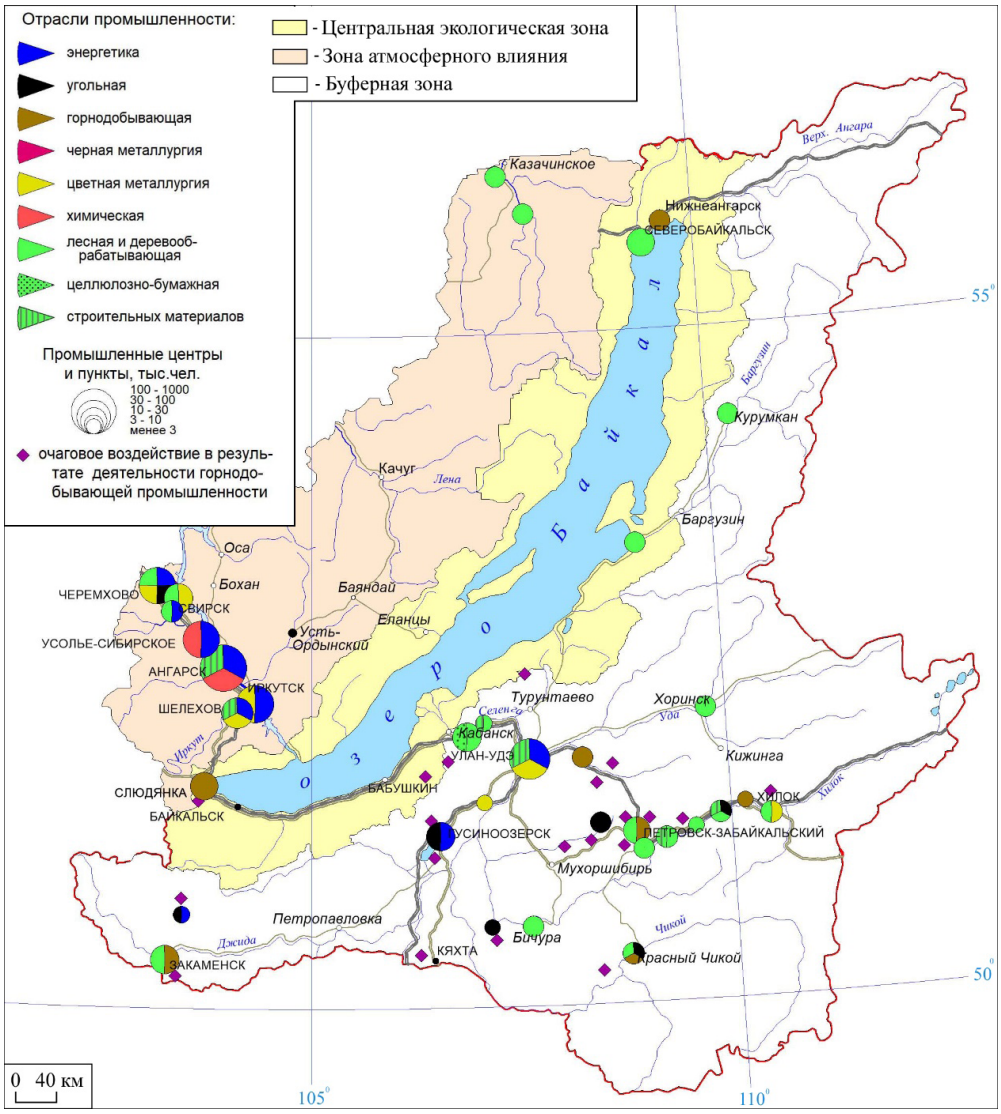

Рис. 3. Промышленность
Fig. 3. Industry

Условием выбора отношений, могущих выступать в качестве координат X и Y, было отсутствие положительной корреляции между их величинами, а критерием правильности выбора трассеров и источников – нахождение большей части точек проб растворенного вещества внутри области смешения. Проба (точка) внутри области смешения содержит в разных пропорциях вещество всех источников, а проба за пределами области смешения – вещество источников, ограничивающих прилежащую к пробе сторону, то есть чем ближе точка к источнику, тем выше его вклад в химический состав вод. В качестве вещества источников рассматривалось вещество горных пород или антропогенных стоков, растворенное в пробах воды, точки которых наиболее далеко отстоят от основного массива в направлениях наибольшего разброса точек.

Предполагалось, что в формировании состава таких проб воды абсолютно преобладает какой-то один тип горных пород или тип антропогенного загрязнения. Природные трассеры подбирались на основе сопоставления химического состава вод с химико-минералогическим составом пород. Вероятные антропогенные трассеры выбирались из числа отношений концентраций технофильных элементов. Величины вкладов источников рассчитывались с использованием систем уравнений многокомпонентного смешения.

После получения данных о химическом составе компонентов геосистем исследуемой территории был проведен их геоинформационный анализ с последующим графическим отображением полученных результатов. Методика геоинформационного картографирования включала несколько этапов:

– создание цифровой основы для картографирования, векторизация картографических источников и материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с точной географической привязкой и приведением пространственных слоев к одной проекции и системе координат;

– создание единой базы данных, объединяющих картографическую, статистическую информацию и материалы полевых наблюдений;

– морфометрический анализ рельефа на основе ЦМР (SRTM 4);

– создание ландшафтной основы для базовых карт мониторинга путем анализа и сопоставления тематических, разновременных слоев в ГИС;

– составление тематических карт (промышленности региона);

– анализ изменения компонентов геосистем с целью выявления структуры загрязнения территории путем анализа пространственного и временного распределения загрязнителей;

– создание электронных картографических слоев, позволяющих идентифицировать участие источников природного и антропогенного растворенного вещества в формировании макро- и микроэлементного составов вод.

Геоинформационный анализ проводился с использованием методики геоинформационного картографирования, включающей создание цифровой основы для картографирования, векторизацию картографических источников и материалов ДЗЗ; создание единой базы данных, объединяющих картографическую, статистическую информацию и материалы полевых наблюдений; морфометрический анализ рельефа на основе ЦМР; создание ландшафтной основы для базовых карт; составление тематических карт; анализ изменения компонентов геосистем; создание электронных картографических слоев, позволяющих идентифицировать участие источников растворенного вещества в формировании состава вод. Анализ изменения компонентов базировался на результатах разновременных исследований состава вод и донных отложений. Ландшафтно-гидрохимическое районирование исследуемой территории проводилось на основе результатов исследований авторов настоящей статьи поэтапно: создание ландшафтной основы; изучение состава вод, донных отложений южных притоков озера Байкал и почв территории; расчет коэффициентов водной миграции; составление схемы районирования территории по способности обеспечивать тот или иной состав вод; сравнение химических свойств вод разных территорий после усреднения их составов на основе ландшафтно-геохимических критериев; разграничение бассейнов рек с помощью сопоставления пространственно-привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS.

Основными данными при геоинформационном картографировании служили топографические карты, формализованные посредством оцифровки в векторный формат. После привязки и последующей трансформации растровых топографических карт различных масштабов был осуществлен их перевод в векторный вид, с последующим созданием различных классов объектов: растительность (древесная, травянистая), гидрография (реки и озера), селитебные зоны (населенные пункты), сельскохозяйственные угодья, линейные объекты (автомобильные дороги, железнодорожные пути и т. п.). При выявлении действующих и пересыхающих водотоков, уточнении контуров речной сети и других водных объектов использовались космические снимки различного пространственного разрешения (Landsat-8, Sentinel-2). Последние уточнения проведены по данным Landsat-8 (дата съемки – 26.06.2021) и Sentinel-2 (T48UVC и сцены восточнее, дата съемки – 09.06.2021).

Важным блоком данных является цифровая модель рельефа. Для получения изолиний рельефа за основу взята модель SRTM 4-й версии, данные которой представляют собой матрицу высот с размером ячейки 3 угловые секунды. Эта матрица была преобразована и приведена к масштабу 1:100 000, а все цифровые слои интегрированы в единую картографическую проекцию и систему координат (WGS 84). Сопоставление пространственно-привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS позволило разграничить бассейны крупных, средних и малых притоков Байкала, уточнить необходимые морфометрические параметры рек.

Корректировка границ бассейнов малых водотоков основывалась на совмещении слоев космических снимков спутников Sentinel-2 с крупномасштабными топографическими картами и данными ЦМР. При необходимости разграничения наиболее мелких или непостоянных водотоков авторами использовались данные полевых работ, которые были получены при отборе проб с фиксацией координат. Изогипсы (горизонтали) создавались для более точного разграничения (выделения) районов, границы которых были проведены по водораздельным линиям. На основе ЦМР были выделены линии водоразделов, по которым и происходило разграничение с использованием алгоритма Watershed Basins в Saga GIS. Полученные векторные границы бассейнов были проверены и откорректированы при совмещении слоя с топографической основой. Для получения изолиний рельефа за основу взята модель SRTM 4-й версии, данные которой представляют собой матрицу высот с размером ячейки 3 угловые секунды. Эта матрица была преобразована и приведена к масштабу 1:100 000, а все цифровые слои интегрированы в единую картографическую проекцию и систему координат (WGS 84). Приведение к данному масштабу было необходимо для сравнения ЦМР с топографическими, тематическими картами и их последующего наложения (совмещения).

Созданная авторами для использования в качестве основ базовых карт и документирования результатов исследований картографическая серия включает 59 сюжетов: картографические основы разного масштаба, карты современного природопользования (землепользование, предприятия-загрязнители), а также карты и картосхемы, иллюстрирующие методы работ и результаты их реализации. При ее подготовке использовались как собственные картографические материалы авторов настоящей статьи, так и опубликованные карты. Создание ландшафтной основы базировалось на методике геосистемного картографирования [*Сочава и др.,* 1965; Сочава, 1978; Семенов, 1991]. Все карты, которые затем послужили вспомогательными материалами для анализа и создания карт макро- и микрокомпонентного состава вод, анализировались преимущественно в контексте выделения наименее загрязненных участков территории бассейна оз. Байкал. Это позволило составить карты «фоновых значений» состава вод (для водотоков, наименее подверженных антропогенному загрязнению). Методика создания электронных тематических слоев подробно не описана, поскольку использовалась общепринятая стандартная методика геоинформационного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главная проблема выявления происхождения растворенного вещества в поверхностных водах – недостаток данных о его возможных источниках. Идентификация природных источников вещества, главными из которых являются горные породы и почвы, осложнена сходством их составов, затрудняющим выбор трассеров. Следствием этого является примитивность процедуры идентификации источников и качественный характер оценки их вкладов. Традиционно выявляют один преобладающий источник, о котором судят на основе преобладания какого-либо компонента или группы компонентов раствора над другими. Так, на основе преобладания анионов сильных кислот над гидрокарбонат-ионом делали вывод о доминировании в бассейне гипса [*Strauch* et al., 2001; *Porowski* et al., 2019] или присутствии в значительном количестве минералов типа пирита [*Mayer* et al., 2010; *Borzenko, Shvartsev,* 2019]. Считалось, что низкие величины отношения гидрокарбоната к сумме анионов свидетельствуют о значительной доле атмосферного вещества в водах [*Hounslow,* 1995]. На основе определенных величин отношений катионов и анионов к натрию устанавливалось присутствие вещества морского происхождения [*Keene,* 1986]. Присутствие в бассейне карбонатных пород устанавливалось по величине минерализации вод: чем она выше, тем выше доля карбонатных пород по сравнению с силикатными [*Bucher* et al., 2017; *Walter* et al., 2017]. С этой точки зрения источниками растворенного вещества вод бассейна Байкала следует считать силикаты, поскольку все воды бассейна слабо минерализованы и относятся к гидрокарбонатному классу, о чем свидетельствует огромное число исследований [Алекин, 1948; Дуров, 1949; *Kemp,* 1971; *Stuyfzand,* 1989].

Публикаций о происхождении растворенного вещества вод бассейна Байкала с использованием микрокомпонентов раствора очень мало, причем об источниках загрязнения судили главным образом по повышенным концентрациям соответствующих загрязнителей: например, повышенные концентрации Mo и Ni в Селенге объясняли попаданием в нее рудничных вод Эрдэнэтского и Джидинского месторождений [*Lychagin* et al., 2017; *Solongo* et al., 2018; *Kasimov* et al., 2020]. Использование соотношения изотопов стронция показало, что растворенное вещество вод большинства малых рек бассейна Байкала имеет силикатное происхождение [Семенов и др., 2005], а вещество Байкала и его крупных притоков – карбонатное [*Falkner* et al., 1991; *Falkner* et al., 1997]. Установить вклады различных силикатных пород в состав растворенного вещества вод с использованием этого отношения не удалось, так как его величина зависит от возраста пород сильнее, чем от их химического состава [Кузьмин и др., 2007].

Таким образом, в бассейне озера Байкал проблема идентификации природных источников заключается в отсутствии трассеров, а выявления антропогенных источников – в отсутствии данных о составе их выбросов. На решение этих проблем направлен разработанный подход к выявлению источников вещества на основе сопоставления химического состава вод с химическим и минералогическим составом пород, позволяющий получить данные об участии источников в формировании макро- и микроэлементного составов вод практически без использования информации о его источниках.

Выявление связи состава металлов вод южных притоков Байкала с источниками растворенного вещества осуществлялось путем расчета коэффициентов водной миграции – отношения доли элемента в минеральном веществе воды к его содержанию в донных осадках рек. Именно использование коэффициентов водной миграции позволило установить, что источником некоторых микроэлементов речных вод являются глубокие подземных воды (воды регионального стока) с составом, не характерным для ландшафтов, в которых формируется состав вод некоторых притоков.

Идентификация источников осуществлялись на основе величин отношений концентраций веществ-индикаторов, называемых трассерами, и являющихся одновременно, координатами диаграмм смешения и коэффициентами при переменных в уравнениях многокомпонентного смешения. Расчет вкладов осуществлялся путем решения систем уравнений многокомпонентного смешения. По результатам данных статистического анализа были выбраны 2 трассера источников макрокомпонентного состава вод: отношение концентраций суммы кальция и магния к калию ($(Ca^{2+}+Mg^{2+})/K^{+}$) и отношение концентраций сульфат-иона и гидрокарбонат-иона (SO_4^{2-}/HCO_3^{-}). С использованием этих трассеров были идентифицированы 3 основные категории источников макрокомпонентного состава вод (силикатные, сульфидсодержащие силикатные и карбонатные породы) и рассчитаны величины их вкладов в макрокомпонентный состав вод. В результате анализа и последующего обобщения полученных данных была выявлена дифференциация бассейнов водотоков исследуемой территории и составлены карты участков, обусловливающих определенный химический состав поверхностных вод (рис. 4).

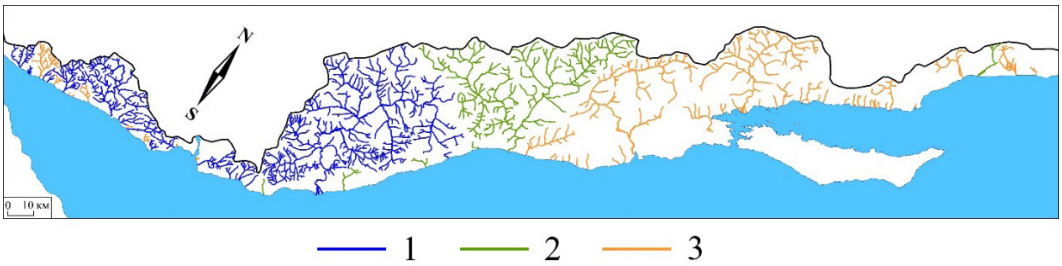

Рис. 4. Пространственное распределение преобладающих типов горных пород, выявленных по трассерам $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/K^{+}$ и SO_4^{2-}/HCO_3^{-}: 1 – сульфидсодержащие силикаты, 2 – силикаты; 3 – карбонаты

Fig. 4. Spatial distribution of predominant rock types identified by tracers $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/K^{+}$ и SO_4^{2-}/HCO_3^{-}: 1 – sulfide-containing silicates, 2 – silicates, 3 – carbonates

Дифференциация водотоков при картографическом отображении осуществлялась с помощью присвоения определенного цвета, соответствующего выбранным параметрам трассеров.

В дальнейшем была предпринята попытка выявления роли микроэлементов в химическом составе речных вод и вкладах притоков в формирование состава природных компонентов байкальской воды. Впервые в качестве трассеров микрокомпонентного состава вод были выбраны отношения концентраций стронция, железа, марганца, молибдена, никеля и ванадия (Sr/Fe, Sr/Mn, Ni/V, Mo/V). Большее (по сравнению макроэлементами) количество трассеров-микроэлементов впервые позволило разделить идентифицированные в качестве природных источников силикатные породы на первичные (кристаллические) и вторичные (глины). На основе микроэлементных трассеров удалось дополнительно выделить в качестве природного источника рудосодержащие силикатные породы, не содержащие сульфидов. При последующей идентификации источников микрокомпонентного состава вод в силу их разнообразия потребовалось использование множества трассеров – в качестве таковых были выбраны отношения концентраций стронция, железа, марганца, молибдена, никеля и ванадия (Sr/Fe, Sr/Mn, Ni/V, Mo/V). (рис. 5).

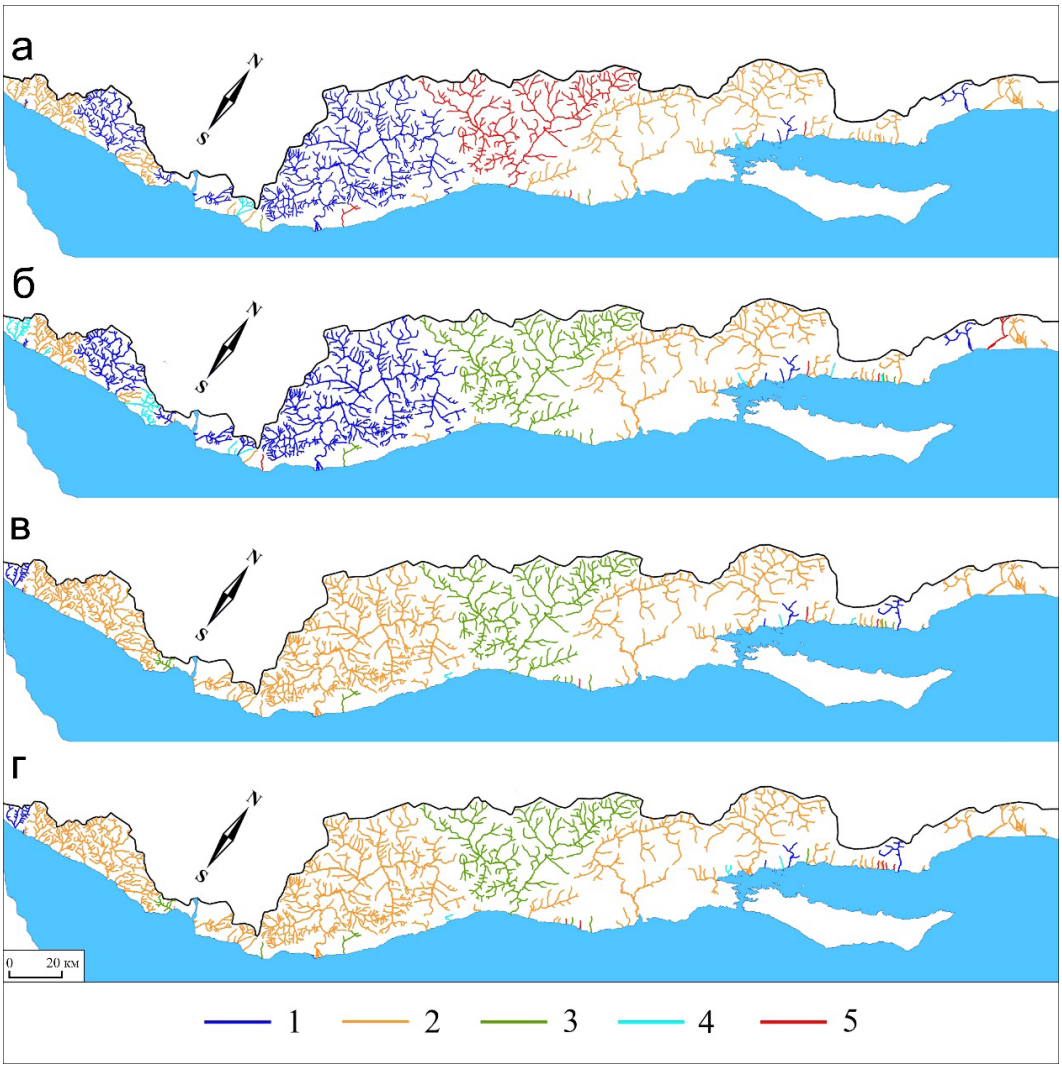

Рис. 5. Пространственное распределение преобладающих типов горных пород, выявленных по трассерам Sr/Fe и Ni/V (а), Sr/Mn и Ni/V (б), Sr/Mn и Mo/V (в), Sr/Fe и Mo/V (г): 1 – сульфидсодержащие силикаты, 2 – силикаты, 3 – карбонаты, 4 – сульфидсодержащие силикаты и силикаты, 5 – силикаты и карбонаты

Fig. 5. Spatial distribution of predominant rock types identified by Sr/Fe and Ni/V (а), Sr/Mn and Ni/V (б), Sr/Mn and Mo/V (в), Sr/Fe and Mo/V (г): 1 – sulfide-containing silicates, 2 – silicates, 3 – carbonates, 4 – sulfide-containing silicates and silicates, 5 – silicates and carbonates

Таким образом, большее количество трассеров позволило идентифицировать большее количество источников: помимо карбонатов и сульфидсодержащих силикатов, в число источников микрокомпонентного состава вод попали глинистые минералы почв и осадочных пород, а также несульфидные руды силикатных пород Кроме того, было обнаружено, что величины отношений концентраций микроэлементов в реках фоновых и загрязняемых территорий различаются. Несоответствие соотношений между концентрациями микрокомпонентов в водах, дренирующих горные породы и антропогенные источники вещества, позволило идентифицировать такие антропогенные источники вещества, как рудничные воды и стоки коммунально-бытовых предприятий, а также рассчитать их вклады в микрокомпонентный состав вод наряду с вкладами природных источников. Наиболее подходящими трассерами антропогенных источников оказались Sr/Fe, Sr/Mn и Ni/V.

ВЫВОДЫ

Исследования, направленные на выявление источников природного и техногенного вещества, а также на оценку их вкладов в состав вещества компонентов геосистем, играют важную роль в ландшафтно-геохимическом обосновании природопользования в бассейне оз. Байкал и планировании мероприятий по его оптимизации. Вместе с тем для корректного решения такого рода задач не хватает информации о региональных естественных и антропогенных источниках формирования и трансформации вещества поверхностных вод. Для преодоления негативных последствий дефицита искомых сведений разработан метод реконструкции состава источников вещества с использованием геометрической модели многокомпонентного смешения на основе сопоставления химического состава вод с химическим составом пород. При выявлении источников растворенного вещества и оценки их вкладов в формирование макро- и микроэлементного составов поверхностных вод притоков Байкала по каждому из типов многокомпонентного смешения было обработано большое количество значений атрибутов, ставших основой для построения разноцветных картографических моделей. Фоновыми объектами исследований по выявлению происхождения растворенного вещества в поверхностных водах служили реки и ручьи юго-западного и юго-восточного побережья оз. Байкал. В качестве загрязняемых территорий использовались участки в бассейне р. Селенги.

На основе данных статистического анализа были выбраны трассеры источников состава вод, идентифицированы основные категории источников, рассчитаны величины их вкладов в состав вод, выявлены три основные категории источников растворенного вещества (силикатных, сульфидсодержащих силикатных и карбонатных пород) и рассчитаны их вклады в химический состав вод. В качестве трассеров использовались соотношения концентраций макрокомпонентов вод $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/K^{+}$ и SO_4^{2-}/HCO_3^{-}. Выявлены микроэлементные трассеры силикатных и карбонатных пород (Sr/Fe, Sr/Mn, Ni/V и Mo/V), на основе которых вклады силикатных пород были разделены на вклады первичных (кристаллических) и вторичных (глин) силикатных пород, а также дополнительно в качестве источника выделены рудосодержащие силикатные породы, не содержащие сульфидов. Путем сопоставления соотношений концентраций микроэлементов в реках фоновых и загрязняемых территорий, горных породах и сточных водах предприятий выявлены трассеры антропогенных источников загрязнения поверхностных вод (отношения концентраций тяжелых металлов Sr/Fe, Sr/Mn и Ni/V).

По результатам исследований составлены карты территорий, обусловливающих определенный химический состав поверхностных вод, впервые классифицированный на основе соотношения величин вкладов дренируемых горных пород.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№№ госрегистрации тем АААА-А21-121012190059-5, АААА-А21-121032300199-9) при финансовой поддержке Правительства Иркутской области и РФФИ в рамках научного проекта № 20-45-380013.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research is executed at the expense of means of the state task (No. of state registration of subjects AAAA-A21-121012190059-5, AAAA-A21-121032300199-9) with financial support of the Government of the Irkutsk region and the Russian Federal Property Fund within scientific project No. 20-45-380013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А.* Общая гидрохимия (Химия природных вод). Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 208 с.
2. *Дуров С.А.* Треугольная форма графического выражения результатов водных анализов и применение ее к классификации природных вод. Гидрохимические материалы, 1949. Т. 17. С. 54–61.
3. *Кузьмин М.И., Дриль С.И., Сандимиров И.В., Сандимирова Г.П., Гелетий В.Ф., Чуканова В.С., Калмычков Г.В., Бычинский В.А.* Вариации изотопного состава Sr в осадочном разрезе оз. Байкал. Доклады Академии наук, 2007. Т. 412. № 4. С. 530–534. DOI: 10.1134/S1028334X07010308.
4. *Семенов М.Ю.* Показатели условий формирования химического состава речных вод в бассейне озера Байкал. География и природные ресурсы, 2017. № 4. С. 170–179. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(170-179).
5. *Семенов М.Ю., Сандимирова Г.П., Коровякова И.В., Троицкая Е.С., Храмцова Т.И., Донская Т.В.* Сравнительная оценка скоростей внутрипочвенного выветривания в ландшафтах северного макросклона хребта Хамар-Дабан. Геология и геофизика, 2005. Т. 46. № 1. С. 50–59.
6. *Семенов М.Ю., Снытко В.А., Маринайте И.И.* Исследование происхождения полициклических ароматических углеводородов в воде озера Байкал. Доклады Академии наук (Науки о Земле), 2017. Т. 474. № 6. С. 746–750. DOI: 10.7868/S0869565217180190.
7. *Семенов Ю.М.* Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. Новосибирск: Наука, 1991. 144 с.
8. *Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.
9. *Сочава В.Б., Михеев В.С., Ряшин В.А.* Обзорное ландшафтное картографирование на основе интеграции элементарных геосистем. Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1965. Вып. 10. С. 9–22.
10. *Borzenko S.V., Shvartsev S.L.* Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia). Applied geochemistry, 2019. V. 103. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.02.014.
11. *Bucher K., Zhou W., Stober I.* Rocks control the chemical composition of surface water from the high Alpine Zermatt area (Swiss Alps). Swiss Journal of Geosciences, 2017. V. 110. P. 811–831. DOI: 10.1007/s00015-017-0279-y.
12. *Falkner K.K., Church M., Measures C.I., LeBaron G., Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.H.* Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs. Limnology and oceanography, 1997. V. 42. No. 2 P. 329–345. DOI: 10.4319/lo.1997.42.2.0329.
13. *Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M., Weiss R.F.* The major and minor element geochemistry of Lake Baikal. Limnology and oceanography, 1991. V. 36. P. 413–423. DOI: 10.4319/LO.1991.36.3.0413.
14. *Hounslow A.W.* Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Boca Raton: CRC press LLC, Lewis Publishers, 1995. 416 p. DOI: 10.1201/9780203734117.
15. *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, 2020. V. 12. Issue 8: 2137. DOI: 10.3390/w12082137.
16. *Keene W.C., Pszenny A.A.P., Galloway J.N., Hawley M.E.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. Journal of geophysical research, 1986. V. 91. Issue D6. P. 6647–6658. DOI: 10.1029/JD091ID06P06647.

17. *Kemp P.H.* Chemistry of Natural Waters. Part VI. Classification of Waters. Water research, 1971. V. 5. Issue 10. P. 943–956. DOI: 10.1016/0043-1354(71)90029-7.
18. *Lychagin M., Chalov S., Kasimov N., Shinkareva G., Jarsjo J., Thorslund J.* Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system. Environmental earth science, 2017. V. 76. Issue 1. DOI: 10.1007/s12665-016-6304-z.
19. *Mayer B., Shanley J.B., Bailey S.W., Mitchell M.J.* Identifying sources of stream water sulfate after a summer drought in the Sleepers River watershed (Vermont, USA) using hydrological, chemical, and isotopic techniques. Appllied geochemistry, 2010. V. 25. Issue 5. P. 747–754. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2010.02.007.
20. *Porowski A., Porowska D., Halas S.* Identification of Sulfate Sources and Biogeochemical Processes in an Aquifer Affected by Peatland: Insights from Monitoring the Isotopic Composition of Groundwater Sulfate in Kampinos National Park, Poland. Water, 2019. V. 11. No. 7. P 1388. DOI: 10.3390/w11071388.
21. *Solongo T, Fukushi K, Altansukh O, Takahashi Y, Akehi A, Baasansuren G, Ariuntungalag Y, Enkhjin O, Davaajargal B, Davaadorj D, Hasebe N*. Distribution and Chemical Speciation of Molybdenum in River and Pond Sediments Affected by Mining Activity in Erdenet City, Mongolia. Minerals, 2018. V. 8. No. 7:288. DOI: 10.3390/min8070288.
22. *Strauch G., Schreck P., Nardin G., Gehre M.* Origin and distribution of sulphate in surface waters of the Mansfeld mining district (Central Germany) – a sulphur isotope study. Isotopes in environmental health studies, 2001. V. 37. Issue 2. P. 101–112. DOI: 10.1080/10256010108033287.
23. *Stuyfzand P.J.* A New Hydrochemical Classification of Water Types. Regional Characterization of Water Quality; IAHS Publication: Oxford, UK, 1989. V. 182. P. 89–98.
24. *Walter J., Chesnaux R., Cloutier V., Gaboury D.* The influence of water/rock-water/clay interactions and mixing in the salinization processes of groundwater. Journal of hydrology and regional studies, 2017. V. 13. P. 168–188. DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.07.004.

REFERENCES

1. A*lekin O.A.* General Hydrochemistry (Chemistry of Natural Waters). Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1948. 208 p. (in Russian).
2. *Borzenko S.V., Shvartsev S.L.* Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia). Applied geochemistry, 2019. V. 103. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.02.014.
3. *Bucher K., Zhou W., Stober I.* Rocks control the chemical composition of surface water from the high Alpine Zermatt area (Swiss Alps). Swiss Journal of Geosciences, 2017. V. 110. P. 811–831. DOI: 10.1007/s00015-017-0279-y.
4. *Durov S.A.* Triangular form of graphic expression of water analysis results and its application to classification of natural waters. Hydrochemical materials, 1949. V. 17. P. 54–61 (in Russian).
5. *Falkner K.K., Church M., Measures C.I., LeBaron G., Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.H.* Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs. Limnology and oceanography, 1997. V. 42. No. 2 P. 329–345. DOI: 10.4319/lo.1997.42.2.0329.
6. *Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M., Weiss R.F.* The major and minor element geochemistry of Lake Baikal. Limnology and oceanography, 1991. V. 36. P. 413–423. DOI: 10.4319/LO.1991.36.3.0413.
7. Hounslow A.W. Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Boca Raton: CRC press LLC, Lewis Publishers, 1995. 416 p. DOI: 10.1201/9780203734117.
8. *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, 2020. V. 12. Issue 8: 2137. DOI: 10.3390/w12082137.
9. *Keene W.C., Pszenny A.A.P., Galloway J.N., Hawley M.E.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. Journal of geophysical research, 1986. V. 91. Issue D6. P. 6647–6658. DOI: 10.1029/JD091ID06P06647.

10. *Kemp P.H.* Chemistry of Natural Waters. Part VI. Classification of Waters. Water research, 1971. V. 5. Issue 10. P. 943–956. DOI: 10.1016/0043-1354(71)90029-7.
11. *Kuzmin M.I, Dril S.I, Sandimirov I.V, Sandimirova G.P, Geletiy V.F, Chukanova V.S, Kalmychkov G.V, Bychinsky V.A.* Variations of the isotope composition Sr in the sedimentary section of Lake Baikal. Reports of the Academy of Sciences, 2007. V. 412. No. 4. P. 530–534 (in Russian). DOI: 10.1134/S1028334X07010308.
12. *Lychagin M., Chalov S., Kasimov N., Shinkareva G., Jarsjo J., Thorslund J.* Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system. Environmental earth science, 2017. V. 76. Issue 1. DOI: 10.1007/s12665-016-6304-z.
13. *Mayer B., Shanley J.B., Bailey S.W., Mitchell M.J.* Identifying sources of stream water sulfate after a summer drought in the Sleepers River watershed (Vermont, USA) using hydrological, chemical, and isotopic techniques. Appllied geochemistry, 2010. V. 25. Issue 5. P. 747–754. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2010.02.007.
14. *Porowski A., Porowska D., Halas S.* Identification of Sulfate Sources and Biogeochemical Processes in an Aquifer Affected by Peatland: Insights from Monitoring the Isotopic Composition of Groundwater Sulfate in Kampinos National Park, Poland. Water, 2019. V. 11. No. 7. P 1388. DOI: 10.3390/w11071388.
15. *Semenov M.Yu.* Indicators of the conditions for the formation of the chemical composition of river waters in the Lake Baikal basin. Geography and natural resources, 2017. No. 4. P. 170–179 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(170-179).
16. *Semenov M.Yu., Sandimirova G.P., Korovyakova I.V., Troitskaya E.S., Khramtsova T.I., Donskaya T.V.* Comparative Assessment of the rates of internal weathering in the landscapes of the northern slope of the Khamar-Daban Ridge. Geology and Geophysics, 2005. V. 46. No. 1. P. 50–59 (in Russian).
17. *Semenov M.Yu., Snytko V.A., Marinaite I.I.* Research of the origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water of Lake Baikal. Reports of the Academy of Sciences (Earth Sciences), 2017. V. 474. No. 6. P. 746–750 (in Russian). DOI: 10.7868/S0869565217180190.
18. *Semenov Yu.M.* Landscape and geochemical synthesis and organization of geosystems. Novosibirsk: Science, 1991. 144 p. (in Russian).
19. *Sochava V.B*. Introduction to the doctrine of geosystems. Novosibirsk: Science, 1978. 320 p. (in Russian).
20. *Sochava V.B, Mikheev V.S, Ryashin V.A.* Overview landscape mapping based on the integration of elementary geosystems. Reports of the Institute of Geography of Siberia and the Far East, 1965. No. 10. P. 9–22 (in Russian).
21. *Solongo T, Fukushi K, Altansukh O, Takahashi Y, Akehi A, Baasansuren G, Ariuntungalag Y, Enkhjin O, Davaajargal B, Davaadorj D, Hasebe N.* Distribution and Chemical Speciation of Molybdenum in River and Pond Sediments Affected by Mining Activity in Erdenet City, Mongolia. Minerals, 2018. V. 8. No. 7:288. DOI: 10.3390/min8070288.
22. *Strauch G., Schreck P., Nardin G., Gehre M.* Origin and distribution of sulphate in surface waters of the Mansfeld mining district (Central Germany) – a sulphur isotope study. Isotopes in environmental health studies, 2001. V. 37. Issue 2. P. 101–112. DOI: 10.1080/10256010108033287.
23. *Stuyfzand P.J.* A New Hydrochemical Classification of Water Types. Regional Characterization of Water Quality; IAHS Publication: Oxford, UK, 1989. V. 182. P. 89–98.
24. *Walter J., Chesnaux R., Cloutier V., Gaboury D.* The influence of water/rock-water/clay interactions and mixing in the salinization processes of groundwater. Journal of hydrology and regional studies, 2017. V. 13. P. 168–188. DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.07.004.