

На правах рукописи



БАЗОВА Мария Михайловна

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОД МАЛЫХ ОЗЕР
КОЛЬСКОГО РЕГИОНА В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

**Специальность 25.00.09 — геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Научный руководитель:

Моисеенко Татьяна Ивановна
член-корреспондент РАН, доктор биологических наук,
профессор, заведующая лабораторией эволюционной
биогеохимии и геоэкологии ГЕОХИ РАН

Официальные оппоненты:

Джамалов Роальд Гамидович
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий лабораторией гидрогеологических проблем охраны
окружающей среды ФГБУН Института водных проблем РАН

Галицкая Ирина Васильевна
доктор геолого-минералогических наук,
заведующая лабораторией гидрогеоэкологии
ФГБУН Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

Ведущая организация:

Институт проблем промышленной экологии Севера
КНЦ РАН (ИППЭС РАН)

**Защита состоится « » 2016 года в «11 » часов на заседании
диссертационного совета Д 002.109.02 при Институте геохимии и аналитической химии им.
В.И. Вернадского РАН по адресу: 119991, Москва, ул. Косыгина, 19 (тел. (495) 939-70-17, факс
(495) 938-20-54).**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) и на сайте www.geokhi.ru в разделе Диссертации.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу ГЕОХИ РАН ученому секретарю диссертационного совета Д 002.109.002 Наталье Александровне Мигдисовой. Пожалуйста, продублируйте отсканированный вариант отзыва с печатью и подписью по электронной почте dissovetal@geokhi.ru не позднее, чем за 14 дней до даты защиты диссертации. В отзыве необходимо указать: ФИО лица, предоставившего отзыв, рабочий почтовый адрес, рабочий (контактный) телефон, адрес электронной почты, наименование организации, работником которой является указанное лицо, структурное подразделение и должность в этой организации.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д 002.109.002

Кандидат геол.-мин. наук



Н.А. Мигдисова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Функционирование горнорудных и металлургических производств на протяжении длительного времени влечет за собой загрязнение окружающей среды и изменения геохимических циклов элементов (Бортникова и др., 2006; Salomons, 1995; Benzaazoua et al., 2004; Garcia et al., 2005; 2007; Kalbe et al. 2007; Chai et al., 2009; Sapsford et al., 2009; Méndez-Ortiz et al., 2007; Yong et al., 2001; Moiseenko et al., 2013 и другие). Доказанным является факт, что за последнее столетие резко увеличилось антропогенное поступление элементов в окружающую среду, связанное с увеличением объемов добычи металлов и их рассеиванием в окружающей среде (Мур, Рамамурти, 1987; Глазовская, 1998; Моисеенко и др., 2006). Воздушное загрязнение, обусловленное локальной эмиссией, а также трансграничным переносом металлов и кислотообразующих веществ (в особенности диоксида серы) в современный период оказывает все большее влияние на геохимические циклы элементов в системе водосбор-водоем, формируя качество вод.

На Кольском Севере более 70 лет функционируют предприятия горнодобывающей и металлургической промышленности. Формирование химического состава вод в регионе обусловлено природными и антропогенными процессами, происходящими как на водосборе, так и в водоеме. Малые озера наилучшим образом отражают последствия аэротехногенного загрязнения вследствие их преимущественного атмосферного питания (Моисеенко, 2003). Проблема выявления особенностей формирования химического состава вод и распределения элементов в воде озер в условиях аэротехногенного загрязнения водосборов металлами и кислотными осадками является одной из наиболее актуальных проблем в современной геохимии и геоэкологии.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы являлось исследование геохимических закономерностей распределения элементов и формирование химического состава вод Кольского региона в зависимости от уровня аэротехногенного загрязнения, ландшафтных и геохимических особенностей водосборов.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) дать пространственно-временную характеристику химического состава вод озер и выявить влияние выбросов диоксида серы (SO_2), никеля (Ni) и меди (Cu) на химический состав вод в период высоких и снижающихся объемов выбросов загрязняющих веществ;
- 2) исследовать особенности миграции элементов в природных водах в зависимости от уровня загрязнения водосборов кислотообразующими веществами, ландшафтных и геохимических условий формирования вод;
- 3) экспериментально изучить влияние геохимических особенностей пород на миграционную активность элементов;
- 4) оценить экотоксикологическую ситуацию состояния озер, не подверженных прямому влиянию промышленных стоков.

Объекты исследования. Объектами исследования являются малые озера Кольского Севера. Всего было проанализировано 97 малых озер. Исходными материалами послужила гидрохимическая база данных по водным объектам Кольского Севера. Оригинальный материал был предоставлен научным руководителем Т.И. Моисеенко для обобщения и интерпретации результатов. Для анализа долговременных тенденций изменения химического состава вод были выбраны данные по 75 малым озерам Кольского Севера, которые получены в исследованиях, проводимых раз в 5 лет (1990, 1995, 2000, 2005 и 2009 гг.). Для детального анализа элементного состава вод были использованы ранее не анализированные базы данных (более 60 элементов), полученные в 2005 году с использованием измерительной техники ICP-MS. Для подтверждения закономерностей нейтрализации осадков и интенсивности выщелачивания элементов в ГЕОХИ РАН были проведены экспериментальные работы. Целью эксперимента являлось изучение интенсивности процессов выщелачивания элементов в нейтральной и кислой среде при взаимодействии с кислыми и щелочными породами Кольского Севера согласно разработанной схеме и с учетом рекомендаций, предложенных в

работе (Бортникова и др., 2010; Алексеев и др., 2011).

Научная новизна.

Дана характеристика особенностей химического состава вод Кольского региона в зависимости от преобладающих типов горных пород, рудопроявлений, а также с учетом ландшафтных особенностей. По классификации О.А. Алекина (1970), основанной на двух принципах: преобладании ионов и соотношениях между ионами минерализации было выделено 6 групп озер для современного уровня и с учетом аэротехногенной нагрузки.

Установлено, что большая часть озер (75) сохраняет буферные свойства вод, их расположение приурочено к породам, способным к нейтрализации кислотных выпадений. Наиболее подверженными закислению являются озера, водосборы которых сложены уязвимыми к кислотным выпадениям породами гранито-гнейсовых формаций. Доказано, что 12 озер Кольского Севера являются антропогенно – закисленными ($pH < 6$, $C_{в} < 30$ $Pt-Co$ шкалы, POB в среднем 4.9 $мгС/л$), 10 озер – природно-подкисленными ($pH = 5-7$, $C_{в} > 60$ $Pt-Co$ шкалы, POB в среднем 14.8 $мгС/л$). Показатель кислотнейтрализующей способности вод таких озер ниже критического (< 50 $мкмоль-экв/л$).

Впервые детально исследованы особенности распределения и водная миграция элементов в зависимости от ландшафтных, геохимических особенностей региона и удаленности от аэротехногенного источника загрязнения. На основе факторного анализа выявлено, что в закисленных озерах увеличилась подвижность таких элементов, как Cd , Sn , Sb , Bi , Se , Re , V , Ni , Co , которые активно вовлекаются кислотными осадками в транспортные потоки с водосборов.

Установлено, что под влиянием кислотных выпадений воды озер щелочных формаций обогащаются элементами в большей степени, чем озера, приуроченные к гранитным формациям, несмотря на низкие pH в последних. В воде озер, отнесенных к юго-восточной части северо-таежной зоны, наряду с повышенным содержанием Al , Fe , Mn отмечено увеличение содержания таких элементов, как Rb , Co , Zn , Sr , Li , Mo , Sn , Zr и редких земель, что обусловлено близостью к Ловозерским и Хибинским тундрам (наличие нефелиновых сиенитов). Доказано, что гумусовые кислоты вовлекают в транспортные потоки с водосборов большую группу элементов, формируя в природно-подкисленных озерах повышенные концентрации редкоземельных, металлов группы железа, а также других элементов Th , Zr , Ti , U , V , Nb , Ba , Ga , Rb , Se .

На основе проведенных экспериментальных работ получены новые данные о высокой миграционной активности элементов, как в кислой, так и в нейтральной среде при взаимодействии с фойяитом, низкой – с териберскими гранитами в первые недели. При взаимодействии с фойяитом в разы увеличилась подвижность K , Nb , Sn , Se , Zr , Sm . Реакция с уртитом показала, что кислая среда способствует усилению миграции щелочных K , Ca , Na и редкоземельных элементов. При взаимодействии с серебрянскими гранитами произошло увеличение миграции Ca и Mo , при реакции с териберскими гранитами напротив, ухудшение миграционных свойств таких элементов, как Ca и S .

Впервые, по 14 элементам рассчитан интегральный индекс токсичности вод (по ГОСТ), характеризующий суммарное воздействие группы металлов, имеющих один и тот же показатель вредности (токсикологический). Показано, что наиболее высокий индекс токсичности формируется вблизи распространения дымовых выбросов производств.

Личный вклад автора. Автор провел анализ и интерпретацию гидрохимических баз данных по малым озерам (1990, 1995, 2000, 2005 и 2009), полученных в ходе экспедиционных натурных исследований на Кольском Севере (Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., 2010). Проведено районирование Кольского региона в зависимости от ландшафтных, геохимических особенностей региона, а также с учетом рудопроявлений и аэротехногенной нагрузки в регионе. Автором впервые проанализированы данные более чем по 60 элементам (за 2005 г.), направленные на изучение геохимических закономерностей формирования элементного состава вод в зависимости от особенностей ландшафтной и геохимической структуры

региона. Проведена статистическая обработка данных с целью выявления процессов, определяющих условия нахождения и поведения элементов в воде озер различных районов. Автор провел экспериментальные работы по изучению химического выщелачивания элементов при взаимодействии с кислыми и щелочными породами Кольского региона.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы для оценки последствий влияния аэротехногенного загрязнения на геохимию природных вод на производствах для обоснования снижения выбросов, при подготовке материалов ОВОЗ, при проектировании новых производств металлургического цикла. Определение интенсивности миграции элементов может быть также использовано при гидрохимических методах поиска месторождений полезных ископаемых.

Апробация результатов и публикации. Результаты исследований, проведенные в ходе работы над диссертационной работой обсуждены на следующих конференциях: V Всероссийская научная конференция с международным участием (Апатиты, 2014); VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов) (Новосибирск, 2014); Естественные и математические науки в современном мире (Новосибирск, 2014); IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2015); Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (Москва, 2015); IX Международная биогеохимическая школа «Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии»; European Geosciences Union General Assembly 2016 (Vienna Austria, 2016).

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 находится в печати.

Объем и структура работы. Диссертационная работа объемом 189 страниц состоит из 5 глав, введения, заключения и приложений, содержит 23 рисунка и 32 таблицы. Список литературы включает 156 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, член-корр., профессору, д.б.н., Моисеенко Т.И за предоставление оригинального материала для анализа и обобщения результатов. Д.х.н., профессору Рыженко Б.Н., д.г.-м.н., профессору Гричуку Д.В., к.г.н. Ефимовой Л.Е. за ценные консультации и замечания, сотрудничество по вопросам геохимии; сотрудникам Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН и Института водных проблем РАН за проведение химико-аналитических работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-17-00460.

В работе защищаются следующие основные положения:

1. Влияние аэротехногенного источника загрязнения подтверждается повышенными концентрациями техногенных сульфатов в водах Кольского Севера, включая удаленные от металлургического производства районах. Их средние концентрации в водах озер вблизи производств составляют 1.7-3.8 мг/л, в удаленных районах 1.2-2.0 мг/л, что обуславливает развитие закисления вод на кислотоуязвимых по геологическому строению водосборах.
2. В результате сокращения выпадения сульфатов за последние 20 лет процессы изменения химического состава вод малых озер развиваются по 3 сценариям: в 45 % исследованных озер происходит «восстановление», т.е. увеличение ANC, щелочности и pH; в 24 % озер продолжают развиваться процессы закисления; в 31 % озер изменения в химическом составе вод не прослеживаются.
3. Выпадения на водосборы кислотных осадков определяют повышенные концентрации в природных водах таких элементов как Cu, Ni, Se, Bi. Вне зависимости от антропогенного или природного подкисления воды Кольского Севера при низких pH обогащены Al, Fe, Mn, Cr, Zn, Cu, Ni, Co, Sr, Li, Ag, Pb, Y, V, As, Mo, Sc, Cd, Sn, Sb. Высокими коэффициентами водной миграции, рассчитанными как отношение относительных концентраций в воде к кларкам

горных пород конкретных водосборов, характеризуются Bi, Se, Re и повышенными - Cu, Ni, Co, Zn, Ag, Sn, Pb, As, Sb, Mo.

4. Наибольшая интенсивность перехода элементов в раствор (по данным экспериментальных работ) характерна для элементов как в кислой, так и в нейтральной среде при взаимодействии с фойитом (Al, Mo, W, U), в меньшей степени с уртитом (Rb, La, Zr, U), а самое низкое - с териберскими гранитами (Rb, Mo, U) в первые недели. В целом, выщелачивание в кислой среде происходит быстрее, по сравнению с нейтральной средой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Формирование химического состава вод в современных условиях антропогенной нагрузки (литературный обзор)

Среди антропогенно-индуцированных процессов, оказывающих непосредственное влияние на геохимические особенности формирования природных вод, выделяют: загрязнение вод металлами вследствие аэротехногенного рассеивания промышленных производств, закисление, биогенную нагрузку, и антропогенное засоление (Никаноров, 2001; Моисеенко, 2003; Моисеенко и др., 2006).

В последние десятилетия, важную роль играют кислотные осадки, которые изменяют геохимические циклы элементов, как на водосборе, так и в водоеме (Моисеенко, Базова, 2016; Nelson, Campbell, 1991; Johansson et al., 1995; Manio, 2001; Schindler, 2001). Закисление способствует увеличению миграционной способности металлов в почвах (Monitor, 1986; Bergkvist, 1987), которые в свою очередь поступают в воды озер (Dickson, 1980). Изменения pH влияет на физико-химические свойства металлов, их биодоступность и токсичность (Campbell, Stokes, 1985).

Антропогенное закисление вод является сложным процессом и сопровождается не только снижением pH, а ему предшествуют геохимические процессы на водосборе, обусловленные прямыми и опосредованными эффектами выпадения кислотообразующих веществ и их сухого поглощения подстилающей поверхностью: снижается насыщение почв на водосборе обменными основаниями и соответственно их содержания в поверхностных и подземных водах, уменьшается щелочность вод за счет вытеснения гидрокарбонатов более сильными техногенными кислотами, происходит выщелачивание металлов из слагающих водосборы пород (Моисеенко, Гашкина, 2010). Наиболее подвержены закислению малые озера автономных ландшафтов. В мировой практике основным критерием оценки закисления вод является кислотонейтрализующая способность вод (ANC) (Henriksen et al., 1998).

Общая характеристика региона. Кольский Север представляет собой полуостровную и материковую часть, является модельным регионом для оценки особенностей и процессов формирования химического состава вод в условиях аэротехногенного загрязнения водосборов. Регион простирается от тундровой до таежной зон, на его территории расположено более ста тысяч озер (Ресурсы, 1970). Геологическая структура представлена магматическими породами: кислыми (граниты, гранодиориты), средними (диориты, сиениты) и основными (базальтоиды, габбро и др.), а также гнейсовыми и сланцевыми породами метаморфического происхождения.

Уровень антропогенной нагрузки. Антропогенная нагрузка на территорию Кольского региона начала формироваться еще в 30-е годы и нарастала до 80-х годов XX века. В настоящее время по мощности и многофакторности она сравнима с наиболее загрязненными северными регионами мира.

Богатство природно-сырьевых ресурсов Кольского Севера обусловили высокую концентрацию предприятий горнорудной и металлургической промышленности (Luzin et al., 1994; Доклад..., 2014). Уникальность минерально-сырьевой базы заключается в том, что более 60 элементов таблицы Д.И. Менделеева обнаружено в промышленных концентрациях, а около 30 извлекаются горнопромышленными предприятиями. На Кольском Севере широко

распространены медно-никелевые, железные, редкометалльные, фосфатные и апатито-нефелиновые руды, в меньшей степени неметалл орудное сырье - флогопит и вермикулит, мусковит, кварц-полевошпатовое сырье (Пожиленко и др., 2002)

Два комбината «Печенганикель» и «Североникель» являются главными источниками эмиссии диоксида серы и тяжелых металлов (рис. 1). По данным Moiseenko (1994) в начале 1980-х годов около 70% территории Кольского Севера было подвержено аэротехногенному загрязнению SO₂. В 1985 - 1988 гг. технология выплавки металлов была усовершенствована путем обжига никелевого концентрата с использованием кислорода, что способствовало снижению аэротехногенного загрязнения на 30-50 % (Даувальтер, 2005).

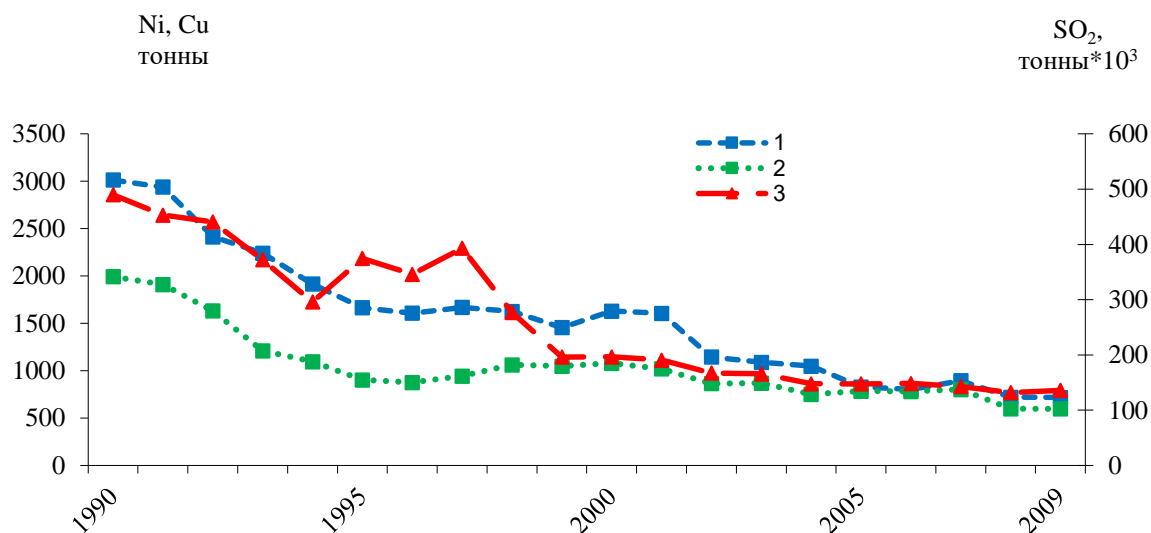


Рис. 1. Выбросы в атмосферу: 1 - Ni (тонн/год), 2 - Cu(тонн/год) и 3 - SO₂ (тыс. тонн /год) в период 1990-2009 гг. (Обзор, 2010).

Глава 2. Характеристика объектов. Материалы и методы

Методы аналитических измерений. Материалы, предоставленные для анализа и обобщения, выполняли по единым методикам в соответствии с соблюдением методов и рекомендаций ICP – Water программы (Standart Methods, 1992; ICP-Water report, 2007; Mosello et al., 1996) в лабораториях Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС КНЦ РАН). Аналитическая программа работ включала в себя определение pH, электропроводности (χ), суммы катионов $\sum \text{кат.}$ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}), щелочности (Alk), содержание техногенных сульфатов (SO_4^{2-*}), Cl⁻, цветности (Цв), растворенного органического вещества (POB), общего азота и фосфора (TN и TP). Концентрации микроэлементов (более 60) элементов определялись методом индуктивно связанной плазмы на масс-спектрофотометре Plasma Quad-3 фирмы Fisions Instruments Elemental Analysis (производство Великобритания) в лицензированной лаборатории Санкт-Петербурга.

Методы оценки миграции элементов в водах озер. Для оценки различных факторов в процессах формирования химического состава вод использовался факторный анализ, в данном случае методом главных компонент. Обработка данных осуществлялась с помощью компьютерной программы «STATISTICA 10.0».

Схема лабораторного эксперимента. Для экспериментальных исследований с целью оценки выщелачивания элементов для анализа были выбраны 2 различных типа горных пород – 1) кислые (серебрянские и териберские граниты) и щелочные породы (фойяит Хибинского массива и уртит Ловозерского массива). Образцы горных пород имеют массу 300 - 350 г, из которых были сделаны шлифы. Далее образцы были раздроблены на дробилке и отобраны методом квартования пробы по 10 грамм для определения химического элементного состава на ICP-AES (макроэлементы) и ICP-MS (микроэлементы). Измерение значений pH

производилось с помощью прибора ЭКСПЕРТ – 001, пределы погрешности составляют ± 0.03 единицы измерения. Эксперимент проходил по одной схеме с двумя разными растворами: 1) нейтральная среда (фоновые условия) - дистиллированная вода ($pH = 6,5$), 2) кислая среда - разбавленная серная кислота (раствор серной кислоты) ($pH = 4,3$). В пластиковые пробирки объемом 50 мл наливали 15 мл раствора, затем помещали 15 г исследуемого образца и оставляли в покое в темном месте на 1 неделю при комнатной температуре (в ходе эксперимента температура в комнате колебалась от 17,4 до 21,2 °С). Через каждые две недели осуществлялся слив раствора, и породы заливались свежими порциями воды. Подобные работы были проведены рядом ученых (Бортникова и др., 2010; Алексеев и др., 2011).

Глава 3. Пространственно-временная изменчивость формирования химического состава природных вод Кольского Севера в условиях изменяющихся антропогенных нагрузок

Ландшафтные и геохимические особенности пород, слагающих Кольский Север достаточно разнообразны, что определяет высокую вариабельность химического состава вод. Территория Мурманской области согласно Пожиленко В.И. и др. (2002) разделена на 15 рудных районов, характеризующихся определенными геологическими и металлогеническими особенностями (развитием рудных формаций или месторождений одного, или нескольких металлов). Совместный анализ выделенных в указанной работе структур, а также ландшафтно-геологических особенностей региона позволил обосновать 7 районов по геохимическим и ландшафтным показателям, с преобладающими типами горных пород и учетом интенсивности аэротехногенного загрязнения: I – Мурманский, II – Лапландский, III – Кандалакшский, IV – Хибинско-Ловозерский, V – Мончегорский, VI – Печенгско-Аллареченский, VII - Беломорский (рис.2). I и II районы находятся на некотором удалении от горно-рудных проявлений, поэтому могут считаться условно-фоновыми.

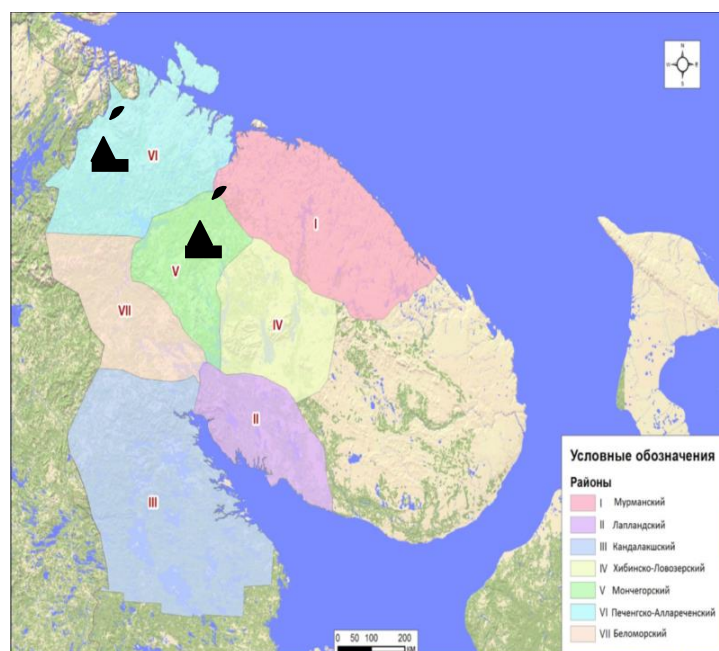


Рис. 2. Карта-схема выделения районов с геохимическими и ландшафтными показателями с учетом интенсивности аэротехногенного загрязнения на Кольском Севере (за основу взята работа Пожиленко и др., 2002)

 медно-никелевые комбинаты

По классификации О.А. Алекина (1970), основанной на двух принципах: преобладании ионов и соотношениях между ионами минерализации было выделено 6 групп озер (рис. 3). Показано, что продолжительный уровень аэротехногенного загрязнения оказывает непосредственное влияние на химический состав вод. Большая часть озер Кольского региона относится к сульфатно-кальциевому (33 озера) и сульфатно-натриевому (27 озер) типам, расположенным в районах, подверженным наибольшей аэротехногенной нагрузке. В фоновых районах 17 озер являются хлоридно-натриевыми вследствие влияния морских аэрозолей.

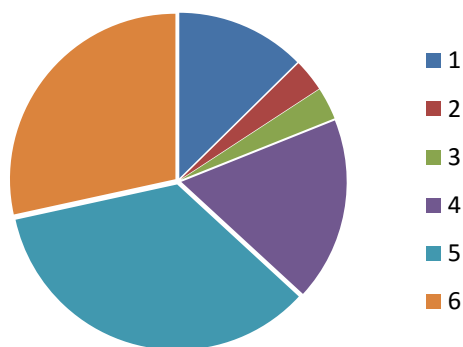


Рис. 3. Классификация озер по преобладающему катиону и аниону и соотношений между ними (по О.А. Алекину): 1 - гидрокарбонатно-кальциевые, 2 - гидрокарбонатно-магниевого, 3 - гидрокарбонатно-натриевые, 4 - хлоридно-натриевые, 5 - сульфатно-кальциевые, 6 - сульфатно-натриевые

В большинстве озер Кольского Севера водная среда характеризуется как близкая к нейтральной (рН=6-7), цветность варьирует в широких пределах – от 10 до 100 ⁰Pt-Co шкалы и более (табл. 1). Несмотря на высокую вариабельность содержаний органического вещества (от 2.4 до 14.8 мгС/л), бесспорным является факт, что воды озер с низкими значениями рН и содержаниями органических кислот свидетельствуют об антропогенном закислении озер (Moiseenko, 1994; 2003). Наиболее подверженными закислению являются озера, водосборы которых сложены уязвимыми к кислотным выпадениям породами гранито-гнейсовых формаций. Природное подкисление озер обусловлено наличием в воде гумусовых кислот вследствие высокой степени залесенности и заболоченности водосборов

Таблица 1. Распределение озер (n – количество озер) в зависимости от рН и цветности вод на Кольском Севере (по данным 2005 г.).

рН	Цветность, ⁰ Pt-Co шкалы					Всего
	<10	10-30	30-60	60-100	>100	
4-5	*1	3	-	**1	-	5
5-6	6	2	1	1	3	13
6-7	5	33	32	5	1	76
7-8	1	1	1	-	-	3

* антропогенно-закисленные озера

** природно-подкисленные озера

Долговременные тенденции изменения химического состава вод в условиях изменяющихся антропогенных нагрузок и климата (1990-2009 гг.)

Для оценки направленности процессов формирования качества воды большое значение имеют именно долговременные ряды наблюдений (табл. 2).

Таблица 2. Медианные значения основных показателей химического состава вод (в мкмоль-экв/л) за 20-летний период (1990-2009) в различных районах Кольского Севера (I – VII – вышеперечисленные районы с различной геохимией ландшафтов)

Год	рН	Σкат.	АІК	SO ₄ *	СІ	ANC
I, n=10						
1990	6.31	269	83	127	150	-9
1995	6.46	244	69	45	139	65
2000	6.64	253	74	42	121	88
2005	6.15	277	48	39	144	92
2010	6.29	263	50	35	142	69
II, n=15						
1990	6.67	185	146	53	42	96
1995	6.54	179	140	40	30	143
2000	6.49	153	133	24	27	152

2005	6.36	168	145	27	28	156
2009	6.12	136	129	20	25	180
III, n = 23						
1990	7.16	435	328	54	45	334
1995	7.07	399	295	55	32	326
2000	7.18	411	318	52	34	355
2005	6.55	410	209	43	33	329
2009	6.98	473	330	45	33	402
IV, n=12						
1990	6.13	269	69	96	150	30
1995	6.16	244	74	45	139	44
2000	6.24	253	83	42	121	39
2005	6.42	277	116	39	144	50
2009	6.39	272	163	35	142	71
V, n=7						
1990	6.02	246	104	181	105	109
1995	5.86	277	113	164	96	103
2000	5.77	283	118	153	88	98
2005	5.44	297	120	144	83	85
2009	5.41	303	126	139	81	79
VI, n=23						
1990	6.75	466	121	172	131	201
1995	6.70	488	118	168	126	189
2000	6.67	497	120	154	115	175
2005	6.50	503	120	150	112	166
2009	6.49	507	126	145	107	159
VII, n=7						
1990	6.92	282	136	63	45	115
1995	6.70	293	143	59	42	136
2000	6.68	304	165	57	38	147
2005	6.63	307	189	54	37	166
2009	6.60	316	194	51	36	167

В воде озер северо-восточной тундры (I) в ответ на снижение содержания техногенных сульфатов произошло восстановление буферных свойств в воде озер. За счёт высокого содержания катионов происходит увеличение показателя ANC. Воды озер характеризуются повышенным содержанием биогенных элементов и органического вещества вследствие распространения торфянистых почв. Наличие торфяно-глеевых и торфяно-болотных со сфагновым и травяным торфом почв обуславливают обогащение вод гумусовыми веществами и соответственно увеличение содержания в воде растворенного органического вещества.

В воде озер, отнесенных к юго-восточной части северной тайги (II) вследствие снижения содержания техногенных сульфатов происходит почти двукратное увеличение ANC. В тоже время в озерах наблюдается уменьшение основных катионов, щелочности и pH, что связано с низкой способностью пород водосбора к нейтрализации кислотных выпадений. В воде озер в силу высокой залесенности и заболоченности территории наблюдалось увеличение содержания органического вещества.

Вследствие высокой буферной способности горных пород в озерах, расположенных в западной лесотундровой части региона (III) и юго-западной части северной тайги (VII) в силу уменьшения концентрации техногенных сульфатов закономерно увеличилась щёлочность и содержание основных катионов.

В воде озер Хибинских и Ловозерских массивов (IV) наблюдается восстановление буферных свойств, которое проявилось в увеличении щелочности, pH и ANC. В воде озер отмечено двукратное снижение растворенного органического вещества.

В воде озер, расположенных в зоне влияния медно-никелевых комбинатов (V и VI) содержание сульфатов высокое по сравнению с другими районами и снижение их с 1990 г. по

2005 г. происходит только на 20 мкмоль-экв/л при более чем трехкратном снижении выбросов Кольскими комбинатами диоксида серы в атмосферу (рис. 1). Очевидно, что накопленные на водосборе сульфаты за предшествующий сокращению более чем 50-летний период интенсивного функционирования горнопромышленных комплексов продолжают мигрировать в озера, поддерживая их высокие концентрации в воде. Воды озер этого региона также характеризуются увеличением содержания растворенного органического вещества.

Глава 4. Геохимические факторы, определяющие поступления элементов в природные воды

Микроэлементный состав воды малых озер. Воды озер тундрового района в связи с минимальной техногенной нагрузкой и преобладанием пород кислого состава (гранитосодержащие породы) характеризуются низкими концентрациями большинства элементов по сравнению с условно-фоновыми концентрациями. В озерах юго-восточной части региона по сравнению с тундровой зоной наблюдается повышенное содержание таких элементов, как Al, Fe, Mn, Mo, Sn, Zr, Sc, а также редких земель Y, La, Ce, Sm, Gd, Pr, Nd, что обусловлено более развитым почвенным слоем и близостью к Ловозерским и Хибинским тундрам, которые характеризуются наличием месторождений щелочных и щелочноземельных элементов. В воде озер западной лесотундровой части региона отмечено повышенное содержание редкоземельных и Co, Pb, Cr, Cd, Sb, Ag, W, Zr элементов, по сравнению с водами северной части Фенноскандии, вследствие большого разнообразия геохимического состава слагающих пород.

Выщелачивание щелочных пород Хибинского и Ловозерского массивов кислотными осадками (с pH ниже 5.0) приводит к их нейтрализации и миграции в воду щелочных и щелочноземельных элементов. Увеличение в воде озер содержания U, Sn возможно связано с месторождениями Ловозерских тундр. Воды озер, характеризуются повышенными значениями Al, La, Sr, U, Be. В силу особенностей геологической структуры (наличие щелочных гранитов и нефелиновых сиенитов), воды озер характеризуются повышенным содержанием таких характерных элементов, как Rb, Cs, Sr, Li и редких земель.

Наиболее высокий уровень аэротехногенного загрязнения, характерен для озер, расположенных в зоне влияния комбината «Североникель», что способствовало увеличению содержания таких элементов, как Cu, Ni, Zn, Mn, Sr, Li, Ba, V, Ag, Se, Bi. Концентрации Cu и Ni по сравнению с условно-фоновыми превышены в 10-12 раз. Озера, приуроченные к комбинату «Печенганикель» также загрязнены, характеризуются повышенными содержаниями Ba, Rb, Cs, Y, которые входят в состав биотитовых, амфибол-пироксеновых гнейсов. Повышенное содержание Cu и Ni обусловлено выбросами от предприятий, увеличение в водах Ti и V возможно также связано с рассеиванием элементов в процессе добычи руды.

Факторы, определяющие поступление микроэлементов в воды озер. Для оценки факторов, определяющих биогеохимические особенности формирования природных вод, наряду с концентрациями элементов, были использованы показатели водной среды, оказывающие влияние на миграцию элементов (Моисеенко, Базова, 2016): pH, $\Sigma_{кат.}$, ANC, SO_4^{2-*} , POB, TN, TP. Принцип выделения элементов был основан на двух условиях: элемент находился в значимых концентрациях в воде и представлял основную группу элементов, связанных с определенным типом пород Кольского региона и имеющих значимые связи между собой. Значимыми факторными нагрузками были те, квадрат коэффициента корреляции которых был больше 0.5 при достоверности $p < 0.05$. Показатели в таблице 3 расположены в порядке убывания коэффициента корреляции, причем на первом месте стоят основные показатели химического состава воды, которые отражают ландшафтные и геохимические особенности формирования вод. В каждом районе выявлены факторы, которые определяют миграционную

активность элементов. Следует отметить что, несмотря на условное подразделение Кольского Севера на ландшафтно-геохимические районы, в той или иной степени близлежащие районы и связанные с ними породы могут также оказывать влияние на содержание микроэлементов в целом в регионе.

Фактор 1 имеет наибольшие факторные нагрузки, показывает тесноту связи элементов с ландшафтно-геохимическими особенностями водосборов. В воде озер Мурманского района (I) наибольший вклад в объяснимую дисперсию (30 %) вносят растворенное органическое вещество (POB) и низкие pH вод. С этими показателями взаимосвязана такая группа элементов, как Co, W, Br, Pd, поскольку гранитные породы трудно выщелачиваются, почвенный покров тонок в этой ландшафтной зоне. Вторым по значимости фактором, несмотря на значительное удаление от источника эмиссии кислотообразующих газов, является поток техногенных сульфатов, с которым взаимосвязаны концентрации Ni и Cu, а также Al, Fe, Y, Ru.

В Лапландском районе (II) вследствие высокой доли заболоченности территории (наличие торфянистых и болотных почв), а также лесных массивов повышается влияние биотического круговорота на поток элементов с водосбора, что проявляется в большей связи элементов (Sr, U, Ag, W, Ga) с биогенными элементами (фактор 1 дает 33 % объяснимой дисперсии). Низкие значения ANC (фактор 1) определяют процесс закисления вод и миграционную активность таких элементов как Sb, As, Cd. Органическое вещество способствует переходу в воду Al, Hf, Sc и редкоземельных элементов (Y, Gd, Sm, Pr), а также металлов Fe, Mn.

Для Кандалакшского района (III) определяющую роль играет разнообразие геологической структуры (рудноносных пород) и залесенность, что подтверждается высоким процентом объяснимой дисперсии (фактор 1, 51% объяснимой дисперсии). POB взаимосвязано с большой группой микроэлементов: Ag, Bi, Zn, W, Sr, редкоземельными La, Gd, Pr; Sc и металлами группы железа Fe, Cr, Mn. Вторым по значимости фактором выступает влияние аэротехногенного источника загрязнения, индикатором которых являются техногенные сульфаты (SO_4^*), которые способствуют выщелачиванию катионов и соответственно ряда микроэлементов Cu, Ni, Rb, В, Y. Фактор 3 определяет влияние биотического круговорота на вовлечение таких элементов как Mo, Pd, Nd, Pb.

В воде озер, расположенных в Хибинско-Ловозерском районе (IV) ведущую роль, играет первый фактор, который дает 29% объяснимой дисперсии и отражает общие закономерности формирования природных вод, обусловленные разнообразием месторождений. В воде озер вследствие высокой буферной емкости щелочных гранитов и сиенитов, произошло обогащение вод элементами Ba, V, Th, Rb, Ti, Sc и редкими землями Sm, Gd, Pr, Nd. Эти породы легко выщелачиваются. Второй фактор (22%) дает объяснение влиянию POB, которое способствует вовлечению в транспортные потоки ряда элементов. Выбросы техногенной серы в данном районе оказывают опосредованное влияние. Фактор 3 (17% объяснимой дисперсии) определяет влияние SO_4^* , которые способствуют выщелачиванию Mo, Cd, Sn.

Озера, находящиеся в зоне влияния комбината «Североникель» (V район) характеризуются взаимосвязанным увеличением содержания большой группы элементов. На усиление потока элементов в воду основное воздействие (фактор 1, 42 % объяснимой дисперсии) оказывает влияние локальной аэротехногенной нагрузки. С содержанием SO_4^* связано увеличение содержания большой группы редкоземельных элементов (Pr, Nd, Sm, Gd, Ce, La), литофильных (Th, Zr, Ti, U, V, Nb), металлов группы железа Cr, Mn, Fe, а также других элементов Ba, Ga, Rb, Se. Известно, что как природные (гумусовые кислоты), так и техногенные (сульфаты) кислоты способствует усилению миграционных свойств элементов (Moiseenko et al., 2016). Фактор 2 отражает выщелачивание элементов в воду в составе катионов, включая Cu, Ni. Влияние второго фактора может быть связано с пылевой эмиссией, которая приводит к насыщению вод катионами, Cu, Ni, а также повышению pH.

В Печенгско-Алареченском (VI) и Беломорском (VII) районах фактор 1 определяет влияние геологической структуры водосборов и кислотное выщелачивание элементов. В VI

районе получен максимальный % объяснимой дисперсии (58 %), что подтверждает ключевую роль влияния аэротехногенного источника загрязнения на поступление Sb, Be, Sc и редких земель (Sm, Gd, Pr) в воды озер. В VII районе влияние кислотных осадков на содержание элементов в воде озер сказывается в меньшей степени (33% объяснимой дисперсии). В воде озер этих районов, обнаруживается повышенное содержание сходной группы элементов Cd, As, U, Ga, Ag, W. В данном случае сложно провести грань между вкладом геологической структуры и влиянием аэротехногенного рассеивания. Фактор 2 подтверждает поступления потока элементов с водосборов в составе катионов. SO_4^{*} , а также пылевая эмиссия оказывают влияние на увеличение содержания Cu, Ni. В воде озер также отмечается увеличение содержания таких элементов, как Al, Fe, Cu, Ni, Sc, Zr, Sm, Y, Pr, Gd.

Глава 5. Экспериментальное подтверждение геохимических особенностей выщелачивания элементов

Кислые осадки, попадая на землю, вовлекают многие элементы, включая металлы, в миграционные потоки, которые оказывают негативное воздействие на живые организмы. С одной стороны, происходит процесс нейтрализации кислотных дождей породами, с другой – кислотное выщелачивание элементов. Геохимические особенности пород влияют на быстроту нейтрализации кислотных дождей. С целью изучения этого феномена были проведены экспериментальные работы с щелочными и кислыми породами.

Анализ водной миграции элементов. Для оценки интенсивности выщелачивания элементов было рассмотрено соотношение w/g , где w – содержание элемента в воде (%), g – содержание элемента в горной породе (%). В нейтральной и кислой водной среде при ее взаимодействии с щелочными породами происходит более интенсивное выщелачивание элементов. В кислой среде при взаимодействии с фойяитом отмечено максимальное содержание щелочных, щелочноземельных и редкоземельных элементов (Pr, Nd, Sm, Ce), в нейтральной среде отмечено увеличение редких земель (Eu, Nd, Er Tb, Dy). Реакция с уртитом показала, что кислая среда способствует усилению миграции щелочных K, Ca, Na и редкоземельных элементов (Eu, Nd, Gd, Ce). Взаимодействие кислого раствора с серебрянскими гранитами обусловило увеличение миграции Ca, Mo и других элементов.

Таблица 3. Взаимокоррелируемые компоненты в выделенных районах Кольского Севера

Район	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
I	POB(0.97),ANC(0.73),pH(-0.65),Co(0.97) W(0.67),Br(0.57),Pd(0.57)	∑кат(0.82),SO4*(0.59),Y(0.84) Ni(0.82),Cu(0.80),Al(0.67),Ru(0.60),Fe(0.56)	TN(0.56),TP(0.63) Sr(0.59),Pb(0.59)
	F - 30 %	F - 17 %	F - 10 %
II	ANC(-0.84),TP(0.63),TN(0.58) ,Sb(0.82),As(0.79),Sr(0.77), U(0.75),Ag(0.68),W(0.66),Cd(0.65),Ga(0.54)	∑кат(0.59),POB(0.72),Hf(0.84),Gd(0.82),Sc(0.79), Sm(0.75),Y(0.74),Pr(0.63),Mn(0.60),Fe(0.59),Al(0.52)	SO4*(0.73),pH(-0.53),Pb(0.64),Zn(0.57)
	F - 33 %	F - 18 %	F - 9 %
III	POB(0.99),ANC(0.61),Ag(0.99),La(0.99),Gd(0.99) Pr(0.99),Bi(0.99),Al(0.98),Zn(0.97),W(0.95), Sc(0.77),Sr(0.72),Fe(0.69),Cr(0.59),Mn(0.53)	∑кат(0.94),SO4*(0.82),Cu(0.99),Ni(0.80) ,Br(0.58),Rb(0.64),Ba(0.52),B(0.55),Y(0.56)	TN(0.84),pH(0.56),TP(0.51), Mo(0.82),Pd(0.81),Nd(0.81),Pb(0.77)
	F - 51 %	F - 18 %	F - 11 %
IV	∑кат(0.72),ANC(0.77),Ba(0.86),Nd(0.83), Sm(0.82),Gd(0.81),V(0.77),Pr(0.74), Th(0.71),Rb(0.67),Sc(0.56),Ti(0.54)	POB(0.63),Al(0.87),Fe(0.85),Co(0.84),U(0.73), Ag(0.73),Sb(0.72),Li(0.71),Pd(0.68),Zn(0.67), W(0.60),Hf(0.59),As(0.53)	pH(0.68),SO4*(0.76),N(0.59),P(0.60), ,Mo(0.76),Cd(0.55),Sn(0.52)
	F - 29 %	F - 22 %	F - 17 %
V	SO4*(0.64),POB(0.96),Pr(0.98),Nd(0.98),Sm(0.97), Gd(0.95),Ce(0.95)Th(0.93),Cr(0.92),Re(0.93), Ba(0.93),Ti(0.93),La(0.91),Ga(0.89),Mn(0.89), Fe(0.86),U(0.83),Zr(0.79),V(0.73), Rb(0.68),Se(0.65),Nb(0.57),Rh(0.56)	ANC(0.77),pH(0.65),∑кат(0.63),Cu(0.80),Ni(0.77), Sr(0.65),Sc(0.64),Hf(0.57),Mo(0.56),Br(0.51)	TN(0.58),TP(0.50),Cd(0.63),Ag(0.62), Co(0.60),Pb(0.54),Sn(0.54)
	F - 42 %	F - 19 %	F - 13 %
VI	ANC(-0.95),SO4*(0.68),pH(-0.66),Sc(0.99),Cd(0.98),Sb(0.98), Ag(0.97),As(0.96),Re(0.96),Be(0.95),Ga(0.74), Nb(0.92),W(0.95),Sm(0.86),Gd(0.83),Pr(0.77),U(0.65)	∑кат (0.92),pH(0.58),Zr (0.81),Al (0.77), Cu (0.68),Fe (0.63),Ni (0.59),Y (0.54)	POB(0.70),TP(0.69),TN(0.55),Y(0.79),Pb(0.70), Pd(0.65),Ru(0.61),Cr(0.51)
	F - 58 %	F - 18 %	F - 11 %
VII	ANC(-0.75),SO4*(0.73),As(0.79),U(0.75), Ag(0.68),W(0.66),Cd(0.65),Ga(0.54)	POB(0.76),∑кат(0.59),Sc(0.79),Sm(0.75), Y(0.74),Zr(0.71),Pr(0.63)Gd(0.62),Mn(0.60)	TP(0.63),TN(0.58),pH(0.53),Al(0.52)
	F - 33 %	F - 18 %	F - 9 %

Примечание: F - % объясняемой дисперсии, достоверность $p < 0.05$; в скобках приведены значения квадрата коэффициента корреляции; жирным шрифтом выделены основные показатели химического состава

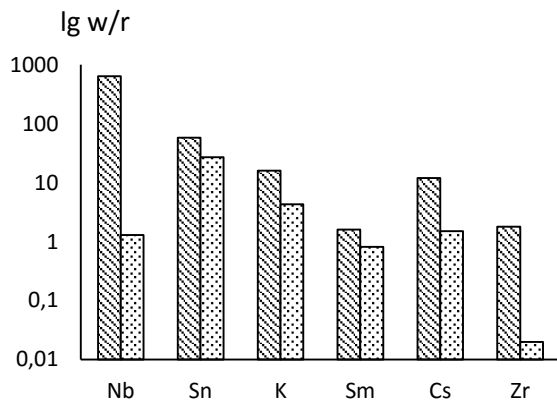


Рис. 4. Интенсивность водной миграции (w/r) в кислой - ▨ и нейтральной - ▤ средах при взаимодействии с щелочными породами (на примере фойяита)

Усиление миграционных свойств элементов особенно наглядно продемонстрировано на примере фойяита (рис. 4). В кислой среде в разы увеличилась подвижность Nb (почти в 500 раз), K (в 4 раза), Zr (в 18 раз), Cs (в 8 раз), Sn (в 2 раза), Sm (в 2 раза). Таким образом подтверждено, что при взаимодействии пород с кислой средой повышается миграционная активность металлов.

Оценка экотоксичных свойств элементов. В системе мониторинга измеряется ограниченное количество элементов, которое не дает представление об опасности загрязнения водной среды металлами и металлоидами. В качестве критерия опасности токсикантов используют показатель $X_T = \sum C_i / ПДК_i$ – интегральный индекс токсичности вод, который представляет собой сумму отношений содержаний химических элементов в воде к предельно допустимым концентрациям (ПДК) этих элементов (Перечень рыбохозяйственных нормативов, 1999). При этом в одну группу объединяются элементы с одним и тем же показателем вредности – токсичные элементы. В качестве элементов, представляющих экологическую опасность были выбраны Pb, Cd, As, Cu, Ni, Be, Sr, Ba, U, V, Cr, Bi, Se, Mo. Для каждого района был рассчитан данный показатель (рис. 5).

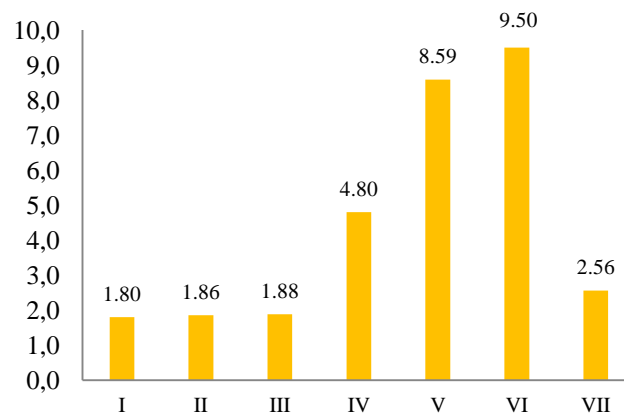


Рис. 5. Распределение индекса токсичности вод в различных ландшафтно-геохимических районах Кольского Севера

В районах, подверженных наибольшей техногенной нагрузке (V и VI районы) значения $X_T=9.50$ и 8.59 соответственно, что с одной стороны свидетельствует о подверженности водных экосистем экологическим рискам, с другой – выщелачиванию кислотными осадками. Самые низкие значения X_T отмечены в I, II и III районах, что в первую очередь связано с отдаленностью от аэротехногенного источника загрязнения. К рассчитанному показателю нужно относиться с определенной долей критики, поскольку в ГОСТ не определено количество элементов, которые должны учитываться. Следует также учитывать, что наибольшую экологическую опасность представляют именно ионные формы, которые преобладают в низко минерализованных водах Севера.

Основные выводы по работе:

1. Выпадения техногенных сульфатов привели к их повышенным концентрациям в водах региона и обусловили закисление вод озер, водосборы которых сложены породами гранито-гнейсовых формаций (23 %). Большая часть озер (77 %) сохраняет буферные свойства вод, их расположение приурочено к породам, способным к нейтрализации кислотных выпадений.
2. За 20-летний период снижения объемов выпадения кислот на водосборы в большей части озер наблюдаются тенденции к повышению щелочности, рН вод и кислотонейтрализующей способности (ANC). Доказано, что в отдельных озерах продолжает прогрессировать закисление вод несмотря на значительное уменьшение выбросов в атмосферу диоксидов серы.
3. Наиболее высокие концентрации элементов (Cu, Ni, Ti, V, Zn, Cr) формируются в зонах распространения дымовых выбросов комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» концерна «Никель». В водах озер Хибинских и Ловозерских тундр отмечены более высокие концентрации Al, Sr, Rb, Cs, La, U, Be как следствие выщелачивания щелочных пород (нефелиновых сиенитов и близких к ним по составу пород)
4. Для закисненных озер, подстилающие породы которых преимущественно сформированы породами гранито-гнейсовых формаций, несмотря на высокую устойчивость пород к химическому выветриванию, характерна относительно высокая интенсивность водной миграции (соотношение w/t >1-10) таких элементов как Cu, Ni, Pb, Cr, V, Zn, Sc, La, Ce, Nd. В водах озер, приуроченных к условно фоновым районам, концентрации микроэлементов минимальны, что связано с их меньшей подверженностью кислотному выщелачиванию.
5. Озера, расположенные в заболоченных регионах, характеризуются низкими рН вод, которые определяются высокими содержаниями гумусовых кислот. Воды таких озер характеризуются более высокими содержаниями таких элементов, как Al, Fe, Co, Zn, Mn, Cr, которые поступают в озера с заболоченных водосборов вместе с гумусовыми кислотами.
6. Факторным анализом доказана определяющая роль выпадения техногенных сульфатов на миграционную активность элементов в водах озер районов, подверженных наибольшей аэротехногенной нагрузке. Ландшафтные особенности, (заболоченность и залесенность) северо-таежной и лесотундровой зон играют значимую роль в подвижности элементов. В районе расположения Хибинских и Ловозерских массивов формирование химического состава вод преимущественно обусловлено разнообразием пород (нефелиновых сиенитов, фойяитов, уртитов, луавритов)
7. Экспериментальными данными доказано, что выщелачивание элементов в кислой среде происходит быстрее по сравнению с нейтральной средой. В кислой среде при взаимодействии с фойяитом и уртитом отмечено максимальное выщелачивание щелочных, щелочноземельных и редкоземельных элементов. При взаимодействии

- с териберскими гранитами в нейтральной среде установлено усиление подвижности нескольких элементов (Са и Мо).
8. Повышенное содержание токсичных элементов в окружающей среде и в природных водах может негативным образом сказываться на состоянии водных экосистем и на здоровье человека. Показано, что согласно ГОСТ совокупность металлов создает экологическую опасность, хотя каждый из них по отдельности ниже значений ПДК.

Список работ по теме диссертации

Статьи

1. Базова М.М. Металлы и металлоиды в природных водах Кольского Севера и их экологическая опасность // *Вестник Тюменского университета*, 2013, № 12, с. 189-198.
2. Моисеенко Т.И., Базова М.М., Ефимова Л.Е. Изменение химического состава вод малых озер Кольского Севера при снижении аэротехногенного загрязнения и потеплении климата // *Доклады Академии наук*, 2014, Т. 456, № 1, С.87-90 (*Doklady Earth Science*, V. 456, №1, P.550-553).
3. Moiseenko T.I., Dinu M.I., Bazova M.M., Heleen A. de Wit. Long-term changes in the water chemistry of subarctic lakes as a response to reduction of air pollution: case study in the Kola North, Russia // *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, V. 226(98). P.1-12.
4. Базова М.М. Особенности формирования химического состава вод малых озер Кольского Севера в условиях аэротехногенного закисления и кислотной нагрузки // *Региональная геология и металлогения*, 2015, № 62, с. 112-115.
5. Моисеенко Т.И., Базова М.М. Закисление вод и его влияние на содержание элементов в природных водах Кольского Севера // *Геохимия*, 2016, № 1, с. 126-140 (*Geochemistry International*, V. 54, №1, P.113-126)
6. Базова М.М. Особенности формирования элементного состава вод Кольского Севера в условиях функционирования горнорудных производств // *Геохимия (в печати)*

Тезисы докладов

7. Базова М.М. Водная миграция элементов в природных водах Кольского Севера в зависимости от характеристик пород и аэротехногенного загрязнения // Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук. Часть 2. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2014. С.110-113.
8. Базова М.М. Развитие процессов закисления в природных водах Кольского Севера в условиях аэротехногенного загрязнения // VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов): Материалы конференции / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск РИЦ НГУ, 2014. С. 242-243.
9. Базова М.М. Особенности миграции элементов в природных водах Кольского Севера в зависимости от геохимии пород и аэротехногенных нагрузок. Естественные и математические науки в современном мире / Сб. ст. по материалам XXV междунар. Науч.-практ. Конф. № 12 (24). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. С. 127-133.

10. Базова М.М. Геохимические особенности формирования химического состава малых озер Кольского Севера в условиях аэротехногенного загрязнения и кислотной нагрузки // *Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, 16-20 февраля 2015 г., Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ».* – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. С. 236-240.
11. Базова М.М. Оценка миграционной активности элементов в природных водах Кольского Севера в зависимости от геохимических особенностей региона и аэротехногенного загрязнения // *Материалы всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, 21-22 апреля 2015 г.*
12. Базова М.М. Долговременные тенденции изменения основных показателей химического состава вод малых озер Кольского Севера в ответ на снижение выпадения кислотообразующих веществ // *Материалы IX Международной биогеохимической школы «Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии», Барнаул, 24-28 августа, 2015 г.*
13. Moiseenko T.I., Bazova M.M. The features of element concentration in natural waters of the Kola North in conditions of environmental contamination // *EGU General Assembly 2016, Wien, Austria, 17-22 April.*