

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН,
д.б.н., профессор ГЕОХИ РАН
Т.И. Моисеенко

Москва

2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Формирование химического состава вод в современных условиях антропогенной нагрузки (литературный обзор).....	11
1.1. Поступление металлов в природные воды и факторы их определяющие.....	11
1.2. Процессы закисления в природных водах.....	15
1.3. Эвтрофирование.....	24
1.4. Природные особенности региона.....	27
1.4.1. Общая характеристика	27
1.4.2. Геологическое строение и рельеф.....	28
1.4.3. Климатические особенности.....	30
1.4.4. Почвенный покров.....	30
1.4.5. Растительный покров и ландшафты.....	31
1.4.6. Гидрографические особенности Кольского региона.....	32
1.4.7. Подземные воды.....	35
1.5. Уровень антропогенной нагрузки	36
Глава 2. Характеристика объектов. Материалы и методы.....	44
2.1. Информационная основа.....	44
2.2. Объекты исследования.....	45
2.3. Методы исследования.....	46
2.3.1. Методы аналитических измерений.....	46
2.3.2. Методы оценки миграции элементов.....	47
2.3.3.Схема лабораторного эксперимента.....	49
Глава 3. Пространственно-временная изменчивость формирования химического состава природных вод Кольского Севера в условиях изменяющихся антропогенных нагрузок.....	52
3.1 Мурманский район.....	57
3.2 Лапландский район.....	58

3.3 Кандалакшский район.....	59
3.4.Хибинско-Ловозерский район.....	60
3.5 Мончегорский район.....	62
3.6 Печенгско-Аллареченский район.....	64
3.7 Беломорский район.....	65
3.8. Изменение рН, техногенных сульфатов, суммы катионов и щелочности в ответ на снижение содержаний сильных кислот	67
3.9 Динамика металлов в воде озер исследуемых районов.....	70
3.10 Содержание биогенных элементов и органического вещества в воде озер.....	75
3.11 Долговременные тенденции изменения химического состава вод в ответ на снижение аэротехногенной нагрузки.....	77
3.12. Изменение содержания органического вещества, биогенных элементов.....	84
3.13 Трансформация органического вещества.....	89
Выводы.....	91
Глава 4. Геохимические факторы, определяющие поступления элементов в природные воды.....	92
4.1 Микроэлементный состав воды малых озер.....	92
4.2 Сопряженное поступление элементов в воды озер.....	99
4.3 Факторы, определяющие поступление микроэлементов в воды озер.....	100
4.4 Оценка миграционной активности элементов в природных водах в зависимости от геохимических особенностей региона.....	109
4.5. Влияние закисления на поведение микроэлементов в воде озер.....	113
4.6. Оценка экотоксичных свойств элементов.....	117
Выводы.....	120
Глава 5. Экспериментальное подтверждение геохимических особенностей выщелачивания элементов.....	121
5.1. Характеристика пород и их кислотные способности.....	121
5.2 Результаты и обсуждение.....	121

5.3 Оценка миграционной активности элементов.....	141
Выводы.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	144-147
Защищаемые положения.....	148
Список литературы.....	149-163
Список работы по теме диссертации.....	164-166
Список рисунков.....	167-168
Список таблиц.....	169-171
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	172
Приложение 1 к главе 1.....	172-175
Приложение 2 к главе 4.....	176-187
Приложение 3 к главе 5.....	188-189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Функционирование горнорудных и металлургических производств на протяжении длительного времени влечет за собой загрязнение окружающей среды и изменения геохимических циклов элементов (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; Бортникова и др., 2006; Moiseenko et al., 2013). 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 и качество вод.

На Кольском Севере более 70 лет функционируют предприятия горнодобывающей и металлургической промышленности. Формирование химического состава вод в регионе обусловлено совокупностью природных и антропогенных процессов, происходящих на водосборе и в водоеме. Малые озера наилучшим образом отражают последствия аэротехногенного загрязнения вследствие их преимущественного атмосферного питания (Моисеенко, 2003). Их изучение позволяет выявить основные тенденции изменения химического состава вод в результате длительного аэротехногенного загрязнения. Проблема выявления ключевых 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 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 за периоды 1990, 1995, 2000, 2005, 2009. Оригинальный материал был предоставлен научным руководителем Т.И. Моисеенко для обобщения и интерпретации результатов. Для детального анализа элементного состава вод (более 60 элементов) были использованы материалы, полученные в ходе выполнения проекта «Формирование химического состава вод в условиях антропогенных нагрузок и изменения климата» в 2005 году. 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 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 периода и с учетом техногенной 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 - гранитогнейсовыми формациями. 12 озер Кольского Севера являются антропогенно – закисленными ($\text{pH} < 6$, $\text{Цв} < 30$ $^{\circ}\text{Pt-Co}$ шкалы, POB в среднем 4.9 мгС/л), 10 озер – природно-подкисленными ($\text{pH} = 5-7$, $\text{Цв} > 60$ $^{\circ}\text{Pt-Co}$ шкалы, POB в среднем 14.8 мгС/л). Показатель кислотонейтрализующей способности вод таких озер ниже критического ($< 50 \text{ мкмоль-экв/л}$).

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.

Установлено, что под влиянием кислотных выпадений воды озер щелочных формаций обогащаются 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, по сравнению с озерами, отнесенными к тундровой зоне 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 (щелочные граниты и нефелиновые сиениты), а также влиянием лесных и заболоченных ландшафтов, более мощным почвенным слоем. Воды Хибинских озер, характеризуются повышенными значениями щелочных (Rb, Cs), щелочноземельных (Sr, Li) и редкоземельных элементов (La, Ce) по сравнению со средними по обозначенным районам. 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 доказано, что высокая миграционная активность элементов, как в кислой, так и в нейтральной среде отмечена при взаимодействии с фойяитом, низкая - с териберскими гранитами, происходит в первую неделю обработки причем в первые недели.

По 14 элементам рассчитан интегральный индекс токсичности вод, характеризующий суммарное воздействие группы металлов на водную экосистему. Показано, что каждый металл в отдельности не превышает ПДК по ГОСТ, однако совокупность металлов по их экотоксичным свойствам создает экологическую опасность, что требует пересмотра регламента.

Личный вклад автора. Автор провел анализ и интерпретацию гидрохимических баз данных (1990, 1995, 2000, 2005 и 2009) полученных в ходе экспедиционных натурных исследований на Кольском Севере (Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., 2010). Автором впервые проанализированы данные более чем по 60 элементам (2005 г.), направленная на изучение геохимических закономерностей формирования элементного состава вод в зависимости от ландшафтно-геохимической структуры. Проведена статистическая обработка данных с целью выявления процессов, определяющих условия нахождения и поведения элементов в воде озер различных районов.

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 методов 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 22 рисунка и 32 таблицы. Список литературы включает 160 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.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.

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

В условиях интенсивного индустриального развития, сопровождающегося увеличением численности населения, активной эксплуатации минерально-сырьевых ресурсов, изменения климата, выпадений кислотных осадков окружающая среда испытывает негативное воздействие. В.И. Вернадский (1989) отмечал, что усиление роли технического прогресса в масштабном плане сопоставимо с геологическими катастрофами. Концепция «устойчивого развития», сходная с идеей В.И. Вернадского о ноосфере, заключается, с одной стороны, в соблюдении экологических требований по отношению к окружающей среде, а с другой — в экономическом обеспечении устойчивого развития общества.

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

1.1. Поступление металлов в природные воды и факторы их определяющие

Микроэлементы в поверхностные воды поступают в водоемы вследствие химического выветривания слагающих водосборы пород и в результате выпадения из загрязненной атмосферы (аэротехногенные). Они также могут поступать в составе сточных вод, обуславливая локальную нагрузку. В последние десятилетия, важную роль играют кислотные осадки, которые способствуют выщелачиванию многих элементов из почв и слагающих водосборы пород, что приводит к повышению их концентраций в воде озер. Техногенное рассеивание элементов связано с увеличением объемов производства. Поступление в природные воды таких элементов, как

Fe, Zn, Mn, Cd, Cr, Mo превышает природные потоки, а такие элементы как Cu, Ni, Pb сопоставимы с антропогенными. Среди источников обогащения окружающей среды элементами наиболее мощным является горнодобывающая промышленность в процессе эксплуатации рудных месторождений (Перельман, 1989).

Распределение металлов в воде озер носит неоднородный характер и обусловлено изменением геохимических циклов элементов, происходящих на водосборе и в водоеме. Многие ученые (Перельман, 1982; Глазовский, 1982; Никаноров, 2001; Моисеенко и др., 2006) объясняют это преобладанием одних химических элементов и нехваткой других. На основе этого выделяют геохимически однородные области или районы, называемые геохимическими провинциями, которые характеризуются преобладанием или недостатком химических элементов. Это понятие впервые ввел А.Е. Ферсман (1937).

А.И. Перельман (1989) объясняет это отклонением элементов относительно кларков в земной коре, а именно чем больше отклонение, тем ярче это сказывается на особенностях концентрации рудных проявлений, состава почв, подземных и поверхностных вод. Также он выделяет границы геохимических провинций, путем выделения типоморфных (ведущих) химических элементов, определяющих особенности данного ландшафта.

Добровольский В.В. (1964) сосредоточил свое внимание на среднем содержании химического элемента для конкретного типа пород и региона, т.е. охарактеризовал понятие геохимического фона. Отклонение от среднего значения в большую сторону свидетельствует о тенденции к рассеиванию элемента, в меньшую – о концентрации. Его целью являлось выявление участков повышенных концентраций и рассеивания элементов, а также изучение пространственных закономерностей изменения геохимического фона. Породы, имеющие одинаковый химический состав и встречающиеся в разных геохимических зонах отличаются значением содержания рассеянных элементов. Это в свою очередь объясняет различие элементов с высокими и низкими кларками.

В связи с усилением роли техногенного фактора целью выделения геохимических провинций является поиск рудных месторождений. Согласно работе Пожиленко В.И. и др. (2002) территория Мурманской области разделена на 15 рудных районов, под которыми подразумевают одну или несколько геологических структур, объединенных по особенностям рудопроявлений, а также по географо-экономическим, административным и историко-социальным признакам.

В работе (Моисеенко и др., 2006) были выделены 3 природно-техногенные провинции по содержанию типоморфных элементов в воде озер и биоаккумуляции металлов в рыбах: 1 – медно-никелевые, 2 – стронциевые, 3 – закисленные. В пределах распространения медно-никелевых техногенных провинций обнаружено изменение микроэлементного состава органов рыб, что приводит к развитию почечнокаменной болезни. В районе функционирования комбината «Североникель» (г. Мончегорск) по 1990-х г. у людей были выявлены почечнокаменная и желчнокаменная болезни. Избыточное содержание стронция оказывает пагубное воздействие на костную ткань рыб и человека, вызывая такие заболевания, как сколиоз и остеопороз. Закисление природных вод определяется увеличением большой группы элементов, среди которых наиболее опасными являются алюминий, ртуть, кадмий, цинк, свинец и т.д. (Campbell, Stocks, 1985). Повышенные содержания этих элементов могут привести к широкому спектру заболеваний.

Антропогенное поступление элементов в окружающую среду сопоставимо и в ряде случаев, даже превышает объемы химического выветривания (Никаноров, 2001; Веницианов, Кочарян, 1994; Моисеенко и др., 2006; Расуна, Расуна, 2001; Rauch, Расуна, 2009). Функционирование горнорудной, металлургической и химической промышленности, формирование отвалов и карьеров в зоне разработки месторождений приводят к увеличению концентрации опасных элементов (металлов и металлоидов) в окружающей среде по сравнению с фоновыми значениями. С

воздушными выбросами плавильных производств происходит рассеивание элементов в природных водах.

Металлы своего рода играют роль «технологических питательных веществ» без которых современное общество не сможет существовать (Smil, 2000). В ряде исследований доказано, что содержание металлов (Zn, Cr, Ag) в породах и воде преимущественно обусловлено выбросами в атмосферу в результате функционирования промышленных предприятий (Nriagu, 1989; Rauch, Расуна, 2009). В начале 21 века запасы и мировые потоки таких металлов как Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn оцениваются более 98% от общей массы металлов, без которых невозможно представить человеческую деятельность. Среди этих металлов Fe и Al составляют больше 95 %, которые составляют основу эмиссионных потоков в воздух, воду и на водосборы. Антропогенная деятельность становится значимой наряду с естественными биогеохимическими циклами таких элементов, как углерод, азот, фосфор и сульфаты, которые в дальнейшем будут составлять основу антропогенных биогеохимических циклов металлов (Rauch, Расуна, 2009). В последние 20-30 лет снижение эмиссии металлов в первую очередь происходит вследствие уменьшения объемов производства, однако сложно установить, насколько быстро произойдет восстановление природных экосистем (Расуна, Расуна, 2001).

Кислотные осадки изменяют геохимические циклы элементов, как на водосборе, так и в водоеме. Поэтому, исследование их влияния на миграцию и круговорот металлов привлекает пристальное внимание ученых и отражено в работах (Nelson, Campbell, 1991; Jeffries, 1997; Moiseenko, 1999; Mannio, 2001). Такие факторы, как природное и техногенное подкисление могут повлиять на круговорот элементов в природных экосистемах (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 в свою

очередь могут влиять на физико-химические свойства металлов, биодоступность и токсичность (Campbell, Stokes, 1985).

Многочисленные исследования доказывают, что в закисленных водоемах увеличивается содержание металлов в воде. Большая часть исследований посвящена формам миграции алюминия и отдельной группы элементов (Nelson, Campbell, 1991; Johansson et al., 1995; Jeffries, 1997; Mannio, 2001; Skjelkvale et al., 2001). Увеличение содержания металлов в воде озер также может быть обусловлено рассеиванием с дымовыми выбросами и ускорением выноса металлов из почв при поступлении сильных техногенных кислот на водосборы (Moiseenko et al., 2015).

1.2 Процессы закисления в природных водах

Интенсивное использование ископаемого топлива и промышленное развитие в прошлом веке привели к формированию кислых атмосферных осадков и закислению вод. Проблема закисления вод резко обозначилась в середине прошлого века в Северной Америке и в Европе, как следствие выбросов в атмосферу кислотообразующих газов, главным образом, диоксида серы (Henriksen et al., 1992).

Процесс закисления вод обусловлен взаимодействием двух факторов: 1) высоким уровнем выпадения кислотообразующих веществ с учетом продолжительности воздействия; 2) природной чувствительности водосбора по геологическим, ландшафтно-географическим и климатическим характеристикам. Уязвимыми считаются водосборы, сложенные гранитами, гранито-гнейсами, а также другими кремнистыми формациями, обнаженные или покрытые отложениями сходной литологии и выщелоченной почвой с низким насыщением ее основными катионами (Моисеенко, 2003).

Для выявления процессов закисления вод малых озер и их восстановления используется ряд критериев (Моисеенко, Гашкина, 2010). Среди критериев закисления были выделены следующие: рН, щелочность,

SO_4^{2-*} , Na^+ и Cl^- (трансформация морских аэрозолей), NO_3^- , ANC, $\Sigma\text{кат.}$, Цв., РОВ.

Щелочность характеризует буферную емкость вод, не содержащих органические кислоты. В озерах, подверженных закислению, снижение щелочности меньше чем на 50 мг-экв/л может привести к риску закисления вод.

Азотная кислота, как серная, относится к сильным кислотам и в равной степени может выступать в качестве закислителя (или закисляющего агента), вытесняя более слабые природные кислоты – гумусовые и гидрокарбонаты (Моисеенко, 2003).

Поступление азота в форме разных соединений в водоем зависит от геохимических особенностей и степени хозяйственной освоенности водосборного бассейна водоема. Распределение и режим соединений азота определяется физическими факторами, а также биохимическими и биологическими процессами, происходящими в водоёмах.

Присутствие нитратных ионов в природных водах связано как с внутриводоемными процессами нитрификации аммонийных ионов микроорганизмами, так и с поступлением в водные объекты в составе атмосферных осадков, промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, стоков с сельскохозяйственных угодий. Содержание нитратов в воде в среднем менялось от 0 до 2 мг-экв/л.

В прибрежной зоне химический состав вод в значительной степени определяется влиянием морских аэрозолей – среди катионов доминирует натрий, среди анионов – хлор. Установлен феномен «эффекта морской соли» в процессах закисления вод (Wright et al., 1988). Этот фактор играет большую роль, особенно в прибрежных районах. Основные катионы, включая натрий морского происхождения, замещаются в почве на протоны $[\text{H}^+]$ вследствие ионно-обменных преобразований. На обедненных обменными основаниями водосборах натрий удерживается, а замещенные протоны поступают в поверхностные воды, вызывая их закисление. В ряде

работ обсуждалось влияние морских аэрозолей на закисление вод вследствие ионно-обменных преобразований в почвах и активного поглощения Na (Wright et al., 1988; Jeffrey et al., 1992; Sulvian, 2001). Активное поглощение Na может обуславливать длительная нагрузка сульфатов на водосборы и вызванный этим дефицит природного насыщения почв водосбора щелочноземельными ионами (Ca) + (Mg). В ряде озер, приуроченных к прибрежным ландшафтам Баренцевого и Белого морей, сульфаты занимали доминирующее положение, а щелочность имела низкие значения, а иногда и нулевые. В таких случаях сложно выделить ведущий механизм закисления вод. Но можно отметить тот факт, что увеличение поступления сульфатов в природные воды приводит к обеднению водосборов катионами, что в свою очередь стимулирует поглощение натрия и высвобождение протонов в воду. Также, под влиянием сильных кислот происходит разложение и вымывание органического вещества (Моисеенко, 2003).

Концентрация техногенных сульфатов в воде (SO_4^{2-*}) является информативным показателем нагрузки кислотообразующих веществ на водные системы. Для определения их доли в анионном составе вод общее содержание сульфатов в воде корректировалось на устранение сульфатов, поступающих в водные системы за счет морских аэрозолей по их соотношению к хлору в морской воде по уравнению (Henriksen et al., 1992):

$$\text{SO}_4^{2-} = \text{SO}_4^{2-}_{\text{общ}} - 0.103[\text{Cl}^-]$$

В этих случаях принимается, что поступление серы из пород за счет химического выветривания незначительный. Как упоминалось, закислению подвержены воды, формирование которых приурочено к гранитным и кварцевым формациям, которые практически не содержат серу.

К антропогенно-закисленным относятся те озера, в которых цветность не выше 30 °Pt-Co и pH меньше 5, в анионном составе доминируют сильные кислоты. В таких озерах ANC ниже 50 мкмольэкв/л, чаще имеет нулевое значение. Для определенного региона эти критерии могут варьировать в ту или иную сторону. В гумидных зонах, к которым относится Кольский Север,

широко распространены природно-подкисленные озера с высокими концентрациями гумусовых кислот. В этих случаях цветность вод бывает значительно выше. Вклад органического аниона в кислотность вод в этих случаях очень высок, особенно для вод с цветностью более 100 °Pt-Co. Следует отметить, что гумусовые кислоты в своем составе могут содержать как слабые, так и сильные органические кислоты. При взаимодействии последних с серной или азотной кислотой кислотные свойства органических веществ будут усиливаться путем образования свободных протонов (Clark et al., 2010).

В мировой практике критерием оценки закисления вод является показатель кислотонейтрализующей способности вод (ANC, мкмольэкв/л) (Henriksen et al., 1998). Он характеризует буферную способность вод к нейтрализации сильных кислот. Показатель кислотонейтрализующей способности вод определяется двумя методами:

$$ANC_1 = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+] - [SO_4^{2-}] - [NO_3^-] \text{ и}$$

$$ANC_2 = [HCO_3^-] + [A_n^-] - [H^+] - [Al^{3+}]$$

Поскольку этот критерий был предложен учеными, которые вели исследования в Скандинавии (Henriksen et al., 1992), было принято, что хлориды в водах малых озер имеют исключительно морское происхождение. Гранитные породы в этих регионах практически не содержат хлорид-ионов, аналогично – породы в северных зонах ЕТР, включая Кольский п-ов и Карелию. При достоверном химическом определении всех составляющих компонентов химического состава вод и хорошем показателе баланса ионов значения ANC_1 и ANC_2 совпадают. Разница между суммой катионов и анионами сильных кислот отражает запас или дефицит гидрокарбонатов, а в случае с водами, обогащенными гумусовыми кислотами – буферную способность системы, включая слабые органические кислоты (Henriksen et al., 1992). ANC зависит от природного насыщения вод обменными основаниями, если содержания катионов ($\sum_{\text{кат.}}$) в водах высокие, то их способность к нейтрализации сильных кислот выше. Для Кольского Севера

значение $ANC=50$ мкмольэкв/л принято считать критическим (Моисеенко, 2003).

Антропогенное закисление вод является сложным процессом и сопровождается не только снижением рН, а ему предшествуют сложные 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. Выпадения кислот на водосборы могут приводить к ускоренному разложению органического вещества и усилению кислотных свойств вод с высокими содержаниями гумусовых кислот. Получается, что механизм закисления вод обусловлен «совместным влиянием сильных неорганических кислот (техногенного происхождения) и природных гумусовых кислот» (Моисеенко, 2003).

В России в начале 1990-х годов было выявлено закисление вод в ряде регионов – в Мурманской области, Карелии, Архангельской и Вологодской областях (Комов, 1997; Moiseenko, 1994; 2003; Лозовик, 2006). Особенно ясно закисление проявилось на Кольском Севере, где функционируют медно-никелевые плавильные производства «Печенганикель» и «Североникель». Было доказано, что в районах, приуроченных к этим предприятиям, развиваются процессы антропогенного закисления вод под воздействием выбросов диоксида серы (Moiseenko, 1994). В работе TI Moiseenko (1994) впервые было показано, что на Кольском Севере закисление вод проявилось в снижении буферной емкости крупных речных систем, появлению кислотных эпизодов на ручьях в период половодья и закислению малых озер. Максимальные выбросы серы от медно-никелевых плавильных были в середине

70-х годов и сохранялись до 80-х годов, когда Кольские комбинаты работали на медно-никелевой руде с высоким содержанием серы, доставляемой из Норильска. В течение 30 летнего эмиссия серы устойчиво снижалась до 2010 года. На Кольском Севере в последние два десятилетия резко снизились выбросы диоксида серы и металлов медно-никелевыми плавильными комбинатами.

Снижение выбросов диоксида серы в Европе и Америке, а также в России начало происходить с середины 80-х годов и наметилась тенденция восстановления озер и рек после их закисления. Поступление окислов азота в атмосферу или сохранялось на прежнем уровне или увеличивалось (Galloway, 1995; Skjelkvale et al., 2001). Значительно наращивают выбросы кислотообразующих газов развивающие страны, особенно Китай (Kuylenstierna, 2001). Поэтому, проблема закисления вод сохраняет актуальность в текущем столетии.

Поверхностные воды во многих кислотно-чувствительных регионах стали частично восстанавливаться от закисления в ответ на уменьшение эмиссии SO_2 (Evans et al., 2011; Driscoll et al., 2003; Skjelkvale et al., 2001, 2005; Stoddard et al., 1999; Monteith et al., 2007). Процесс восстановления водной экосистемы может происходить на водосборе и в водоеме. При снижении выбросов в атмосферу в результате уменьшения потока анионов сильных кислот в водоемах наблюдается увеличение щелочности и кислотонейтрализующей способности вод. Однако, водные объекты, испытывавшие в течение длительного периода времени и продолжающие испытывать антропогенную нагрузку, не отражают те процессы «восстановления», которые развивались в них до интенсивного промышленного освоения территории. «Включились» новые механизмы трансформации геохимических циклов. Под термином восстановление по отношению к закисленным озерам и рекам понимается увеличение рН и щелочности вод и, соответственно, – восстановление

кислотонейтрализующей способности вод (ANC) (Wright et al., 1998). Однако, изменение химического состава вод не всегда однозначно и пропорционально снижению потока сульфатов. Отмечается три сценария развития ситуации пролонгированного изменения химического состава вод: 1) развивается дальнейшее закисление вод, 2) pH и щелочность не изменяются; 3) происходит восстановление химического состава озер (Moiseenko et al., 2015).

Неравномерность тенденций восстановления в различных странах и экорегионах при идентичных условиях снижения содержания сульфатов в воде связано с особенностями формирования вод на водосборе. Поступление основных катионов ($\Sigma_{\text{кат.}}$) с водосбора играет ведущую роль в формировании различий в процессе восстановления буферной емкости вод. Если кислые озера приурочены к уязвимым гранитным породам, питание которых обусловлено преимущественно атмосферными выпадениями, то восстановление происходит достаточно быстро в ответ на снижение выпадения кислот (Skjelkvale et al., 2001).

Изменение химического состава вод (pH, концентрации биогенных веществ и микроэлементов) сказывается на трансформации РОВ в природных водах. Вопросом изучения состава ОВ в природных водах занимались Скопинцев (1950), В.И. Вернадский (1960), А.Д. Семенов (1967), Хатчинсон Д. (1969), В.Ф. Рощупко (1970). В последние два десятилетия исследованию в области изменения содержания органического вещества (ОВ) посвящен ряд работ (Evans et al., 2006; Vuorenmaa et al., 2006; de Wit et al., 2007; Dawson et al., 2009). ОВ поступают в водные объекты с атмосферными осадками; поверхностным стоком; в результате взаимодействия атмосферной влаги с почвенным и растительным покровом на поверхности водосбора. Существенным источником его поступления в водные объекты служат продукты, образовавшиеся в результате внутриводоемных процессов; приток из других водных объектов, из болот,

торфяников; с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами и с водами, сбрасываемыми с орошаемых земель (Скопинцев, 1988).

По происхождению ОВ делят на аллохтонное (поступающее с водосбора) и автохтонное (образующееся в самом водоеме). Образованию автохтонного ОВ в водных средах способствуют два естественных процесса (Хумитаке, 1986). Первый - разложение растительного и животного материала. Второй процесс связан с выделением растениями и животными внеклеточных продуктов жизнедеятельности.

Основную часть аллохтонного ОВ природных вод представляют гумусовые вещества, вымываемые из почв, лесной подстилки, торфяников, болот и других объектов, где содержатся растительные остатки, которые попадают в водные объекты. Также к ним относятся ОВ, вносимые бытовыми и промышленными сточными водами и поступающими из атмосферы.

Основным представителем гумусовых веществ в водных объектах, по оценкам многих авторов, являются фульвокислоты. При изменении физико-химических условий водной среды (рН, минерализации воды и ее температуры) гуминовые кислоты и темноокрашенные фульвокислоты и их соединения, находящиеся в коллоидном состоянии и придающие воде интенсивную окраску, частично выпадают из раствора и осаждаются на дно водоема.

Содержание гумусовых веществ в воде оказывает как положительное, так и отрицательное влияние на водные экосистемы (Driscoll et al., 2003; Evans et al., 2006; Skjelkvale et al., 2005). Положительное воздействие проявляется в способности связывать металлы и другие токсичные вещества.

В последние годы в научной литературе большое внимание уделяется роли органического вещества в процессах закисления вод. Следует отметить, что на гумидной территории широко развиты природно-подкисленные озера с высоким содержанием гумусовых кислот. Для этих озер характерна высокая цветность вод в отличие от прозрачных техногенно-закисленных

озер. Для этих озер характерна высокая цветность вод (более 100 °Pt-Co шкалы) и варьирование pH от 5 до 7 в отличие от прозрачных техногенно-закисленных озер. В последнем случае в анионном составе вод доминируют сильные кислоты, преимущественно сульфаты (Reuss et al., 1987; Sullivan, 2001). Природное подкисление обусловлено наличием гумусовых кислот. Ряд исследований (Brakke et al., 1997; Monteith et al., 2007; Evans et al., 2008; Clark et al., 2010) свидетельствуют об усилении кислотных свойств гумусовых веществ под воздействием сильных техногенных кислот поскольку увеличивается вероятность протекания реакций деструкции крупных органических макромолекул с образованием новых функциональных групп, которые могут иметь в своем составе подвижные ионы водорода. Jeffrey et al. (1992) подтвердили в своих работах, что совместное воздействие сильных минеральных и органических кислот способно усиливать закисление вод. Поэтому, сложно провести грань между природно-подкисленными и техногенно-закисленными озерами. Вклад аниона органических кислот в кислотность вод очень высок, особенно для вод с цветностью более 100 ° Pt-Co. В последнем случае в анионном составе вод доминируют сильные кислоты, преимущественно сульфаты (Reuss et al., 1987; Sullivan, 2001). В кислой среде изменяется не только ионный состав, но и поведение микроэлементов. Большая часть исследований посвящена формам миграции алюминия или отдельной группы элементов (Johansson et al., 1995; Jeffries, 1997; Mannio, 2001; Skjelkvale et al., 2001) и не рассматривает взаимосвязанное поведение всех элементов в условиях природного и антропогенного подкисления.

В большинстве озер в современный период отмечается тенденция снижения pH, а также увеличение органического аниона. Эти процессы идут в разных направлениях. Значение pH, как известно, определяется не только анионами неорганических кислот, но и органических.

Известно, что за последние 15 лет усилился вынос органического вещества в водные системы, что подтверждают примеры в научной литературе и данные настоящего исследования (Stoddard et al., 1999; Driscoll et al., 2003; Monteith et al., 2007; Evans et al., 2008; Clark et al., 2013). Это происходит, во-первых, просто за счет увеличения концентрации слабых органических кислот, которые в значительной степени способны к диссоциации. Во-вторых, при условии, что концентрация органического вещества велика, растет вероятность протекания реакций взаимодействия органических макромолекул с образованием новых функциональных групп, которые могут иметь в своем составе подвижные ионы водорода (Дину, 2009). Протеканию этих реакций может способствовать наличие в водах нитратов, нитритов, фосфатов.

1.3 Эвтрофирование

Поступление биогенных элементов и органического вещества в водоем зависит от геохимических особенностей и степени хозяйственной освоенности водосборного бассейна водоема (Даценко, 2007).

Распределение и режим соединений азота и фосфора определяется физическими факторами, а также биохимическими и биологическими процессами, происходящими в водоёмах (Руководство..., 2003). Соединения азота являются одним из показателей загрязнения природных вод, а также обладают токсичностью. Природными источниками поступления азота и фосфора являются почвенный покров и атмосферные осадки, антропогенный источник – промышленные, а особенно бытовые сточные воды (Даценко, 2007).

Присутствие нитратных ионов в природных водах связано как с внутриводоемными процессами, так и с поступлением в водные объекты в составе атмосферных осадков, промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, стоков с сельскохозяйственных угодий.

В связи с более высокой растворимостью азотные соединения значительно более легко «вымываются» из почв бассейна, чем фосфор (Даценко, 2007). Наличие в водоёмах аммонийных соединений определяется рядом факторов: поступлением с атмосферными осадками, с грунтовыми водами, с промышленными и бытовыми сточными водами, с водосбора, из донных отложений.

Наличие повышенных концентраций азотистых соединений в водоёме указывает на развитие процесса эвтрофирования.

Первые признаки эвтрофирования водоемов появились еще в начале XX века, а серьезное внимание исследованиям этого процесса лимнологи начали уделять в середине XX столетия, когда во многих озерах Европы и Северной Америки отчетливо проявился ускоренный рост продуктивности озер с явно выраженными негативными последствиями их экологического состояния (Россолимо, 1977).

В XX веке значительный рост населения и хозяйственная деятельность человека привели к заметным изменениям глобального материально-энергетического обмена и потоков химических веществ. С точки зрения геохимии, наибольшие изменения миграционных потоков должны происходить для элементов с высокими коэффициентами технофильности (отношения годовой добычи элемента к величине кларка этого элемента), особенно для фосфора, который является главным элементом, контролирующим продуктивность водных экосистем (Савенко и др., 1999). Повышение содержания общего фосфора свидетельствует об ускорении продукционных процессов и повышении трофического статуса озер под действием потепления климата в исследуемый период. Это подтверждается уравнением регрессии:

$$TP=2.56e^{0.0013\Sigma T^0 C}$$

Вопрос изучения процессов эвтрофирования в арктических широтах к настоящему моменту малоизучен. Однако, известно, что водные экосистемы,

расположенные в суровых климатических условиях, уязвимы к антропогенным воздействиям. В ряде исследований были выявлены ключевые процессы эвтрофирования вод (Моисеенко и др., 2001; *Eutrophication of Water...*, 1982): накопление в воде и донных отложениях биогенных элементов и взвешенных веществ органической природы и снижение прозрачности; интенсификация процессов деструкции; усиление расхода растворенного в воде кислорода; изменение окислительно-восстановительных условий среды, а именно снижение pH.

Цветность (Цв) – показатель качества воды, характеризующий интенсивность ее окраски растворенными органическими веществами. В водоемах цветность уменьшается благодаря внутриводоемным процессам (фотохимическое окисление, сорбция, коагуляция и др.), тем интенсивнее, чем продолжительнее время пребывания водной массы в озере или водохранилище (Цыцарин, 1988).

По современным представлениям цветность природных вод определяется наличием в воде окрашенных гумусовых веществ (в растворенном и коллоидном состоянии), среди которых можно выделить несколько групп органических кислот и их солей, имеющих различную окраску – от бурой (гуминовые кислоты) до светло-желтой (апокреновые кислоты). Источниками окрашенного органического вещества (ОВ) в природных водах являются почвы и болота водосбора. Формирование цветности и перманганатной окисляемости происходит под влиянием различных факторов (климат, рельеф, сток), взаимодействие между которыми контролирует поступление ОВ в воды речного бассейна. Таким образом, цветность природных вод отражает сложные связи между ландшафтными особенностями речного водосбора и режимом формирования водного стока (Пономарева, 1954; Ланчикова, Каплин, 1970).

Антропогенное засоление вод развивается как под воздействием нерационального ведения сельского хозяйства и излишнего полива, так и

вследствие потепления климата и связанного с ним увеличения засушливых периодов и усиления испарительной концентрации элементов (Никаноров, 2001; Sereda et al., 2011).

1.4 Природные особенности региона

1.4.1 Общая характеристика региона

Кольский Север представляет собой полуостровную и материковую часть, являясь тем самым модельным регионом для оценки особенностей и процессов формирования химического состава вод в условиях аэротехногенного загрязнения водосборов. Территория занимает северо-западную часть Европейской территории России, охватывает Кольский регион и западную материковую часть Фенноскандии (Мурманскую область). С трех сторон—севера, востока и юга он омывается Баренцевым и Белыми морями, образующими его естественно – географические границы; на западе граница рассматриваемой территории совпадает с государственной границей России, на юге - проходит по южному водоразделу бассейна р. Нивы. Общая площадь территории составляет 130000 км², большая ее часть расположена за Полярным кругом. Территория Мурманской области, занимающая северо-западную часть территории Российской Федерации, представляет собой масштабный индустриальный комплекс. Уникальность территории обусловлена близостью к промышленно-развитым регионам России, морю, возможностью международной торговли, а главное составом минерально-сырьевой и рыбопромысловой базы. Общая площадь Мурманской области составляет 1144.9 тыс.км². На территории региона расположено более ста тысяч озер (Ресурсы, 1970).

1.4.2 Геологическое строение и рельеф

Территория Кольского региона занимает северо-восточную часть Балтийского щита, сложенного породами кристаллического фундамента и

рыхлыми четвертичными отложениями. Рельеф сформировался в дочетвертичное время под влиянием ряда факторов, главными из которых был геолого-тектонический (Лаврова, 1960; Граве, Евзеров, 1964; Ресурсы, 1970). В дальнейшем, процессы рельефообразования (выветривание, аккумуляция, денудация) привели к образованию крупных и мелких форм рельефа. В геологическом отношении на Кольском Севере выделяют два разновозрастных геологических комплекса. Основание представляет собой кристаллический фундамент, сложенный сильно метаморфизованными породами архейского и протерозойского возраста. Докембрийский фундамент покрыт рыхлыми образованиями, которые являются четвертичными ледниковыми и послеледниковыми континентальными и морскими отложениями. В целом для Кольского региона характерно понижение высот с запада на восток и от центра к окраинам; в центре расположены наиболее высокие горы – Хибинские и Ловоозерские массивы. В региональном плане Кольский Север разделен на регионы, отличающиеся по типу рельефа, составом, расчлененностью и др. На территории Кольского Севера выделяют три природные зоны – тундру, лесотундру и северо-таежную зону. Комплекс зональной биоклиматической и аazonальной дифференциации обусловили значительное разнообразие ландшафтов. Именно озера отражают особенности окружающего ландшафта и соответственно процессы, происходящие в озерах, определяются природными особенностями этого ландшафта. Распространенные на территории дочетвертичные кристаллические породы относятся к образованиям архейского, протерозойского и частично палеозойского возраста. Они представлены метаморфическими и эффузивными комплексами с включениями гранитов. Большая часть рассматриваемой территории занята архейскими гранито-гнейсовыми породами (приложение 1, рис. 1).

Территория Кольского региона сложена разными магматическими породами: кислыми (граниты, гранодиориты), средними (диориты, сиениты)

и основными (базальтоиды, габбро и др.), а также гнейсовыми и сланцевыми породами метаморфического происхождения. Максимальное содержание кремния характерно для гранитов и гранитоидов, слагающих большую часть территории, доля кальция и магния больше в основных породах, чем в кислых (табл.1).

Таблица 1. Средний химический состав некоторых магматических пород, % (Войткевич и др., 1990)

Порода	SiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Гранит	70,18	0,88	1,99	3,48	4,11	0,19
Гранитоид	65,01	1,08	3,34	6,00	1,39	0,03
Диорит	56,17	4,17	6,74	3,39	2,12	0,25
Нормальный Сиенит	58,65	3,06	4,45	3,48	4,79	0,31
Базальт	49,06	6,17	8,95	3,11	1,52	0,45
Габбро	48,12	7,51	10,99	1,55	0,89	---

Современный рельеф Кольского Севера представляет собой холмистую равнину с высотами 200-300 метров. В центре региона расположены гряды тектонического происхождения (Хибинские, Ловозерские, Сальные, Волчьи, Чунские тундры и Монче-тундра). Высота горных массивов достигает 1000-1200 м. На территории встречаются впадины, представляющие собой грабены, в которых расположены озера. Амплитуда относительных высот составляет 500-600 м, достигая местами 1000 м. Изрезанность рельефа весьма заметна на севере и северо-востоке территории – на побережье Баренцева моря. Юг территории представляет собой холмистую равнину с отметками 200-300 метров, западная часть представляет собой долины в виде каньонов и впадин.

1.4.3. Климатические особенности

Кольский Север расположен в Атлантико-Арктической зоне умеренного климата, формирующегося под воздействием циркуляционных процессов на севере Атлантического океана. Климатические особенности Кольского региона напрямую связаны с его географическим положением. Северная

часть находится под влиянием теплого течения Гольфстрим. Именно поэтому, Баренцево море в районе города Мурманск не замерзает, а температура воздуха зимой (январь, февраль) соответствует условиям территорий, расположенных южнее. Термические условия у южного побережья более суровые, так как Белое море покрывается льдом. По мере удаления от прибрежных областей, климатические особенности приобретают континентальные характеристики.

В целом для региона характерно избыточное увлажнение (приложение 1, рис. 2). Среднее годовое количество осадков в Центральной части региона составляет около 500-600 мм/год. В горных районах годовое количество осадков увеличивается в 2 раза (до 1000 мм/год).

Связь климата с рельефом и, в особенности, с высотой местности над уровнем моря, четко проявляется в вертикальной зональности метеорологических параметров - падении температуры воздуха, увеличение осадков, силы ветра и продолжительности залегания снежного покрова. На эти особенности накладываются местные факторы, такие как экспозиция склонов, ориентация долин, свойства почвы и другие. В восточной части территории ввиду меньшей расчлененности рельефа, изменчивость климатических условий выражена не так ярко, как на остальной территории.

1.4.4. Почвенный покров

Почвенный покров на территории Кольского региона в целом представлен 4 основными типами почв: тундровыми, подзолистыми, болотными, дерновыми, а также - смешанными: подзолисто-болотными и дерново-подзолистыми (Ресурсы, 1970; Переверзев, 1987; Никонов и др., 1993) (приложение 1, рис. 3). Тундровые почвы занимают тундровую зону, горные вершины и склоны, расположенные выше границы лесной растительности. Как правило, эти почвы маломощны (до 10 см) и не образуют обширных ареалов, а развиваются небольшими площадными участками в несколько квадратных метров. Они распространены на побережье Баренцева моря и в горных районах. Тундровые мелкозернистые

почвы встречаются в восточной части, а также в предгорьях Кейв, на острове Кильдин, и на полуостровах Средний и Рыбачий. Большая часть территории занята подзолистыми почвами. Они встречаются в тундровой зоне (при отсутствии избыточного увлажнения), в лесотундре и в таежной зоне. Средняя мощность подзолов составляет 15-50 см. Маломощные подзолы (до 15 см) отмечены в предгорьях Хибинского и Ловозерского массивов, а более мощные встречаются в низинных частях территории. Болотные почвы занимают не только впадины, но также широтные равнины и пологие склоны. Долины некоторых рек (Ена, Печенга, Тулома, Поной, Варзуга, Умба) занимают дерновые почвы. По механическому составу преобладают песчаные и супесчаные типы почв; в меньшей степени распространены глинистые и щебнистые. Последние занимают возвышенные участки рассматриваемой территории.

1.4.5. Растительный покров и ландшафты

На территории Кольского Севера выделяются 2 основные геоботанические зоны: тундровая и таежная, между ними пролегает лесотундровая зона (Ресурсы, 1970; Reimann et. al., 1998). Возвышенности в пределах таежной зоны заняты горной тундрой. Ландшафты Кольского Севера представлены: лесами с лесотундровыми редколесьями, тундрами, горными арктическими пустынями, болотами, кустарниками и лугами.

Таежная зона (вместе с лесотундрой) занимает большую часть территории, около 80 %, при этом на долю непосредственно лесов приходится лишь четверть занимаемой площади, а остальная часть территории занята водоемами. На долю сосновых и еловых лесов приходится половина всех лесов. Ель распространена преимущественно на востоке территории, а сосна занимает южную и западную части. На севере протягивается обширная полоса березовых редколесий.

Лесотундра состоит из березовых островков и тундр. Подлесок представлен можжевельником. Лишайники на 40-70 % занимают пространство между деревьями.

Тундровая зона простирается на севере и северо-востоке региона в среднем на 20 – 30 км и представлена как зональными (равнинными), так и азональными (горными) ландшафтными районами. Кустарниковая растительность на фоне каменных россыпей и скал по мере удаления от побережья сменяется лишайниками и карликовыми березками. Среди кустарничков выделяют воронику, толокнянку, бруснику и ерник.

Горная тундра расположена на высотах от 350-450 до 750 - 1100 метров. Для нее характерна кустарничково-лишайниковая растительность, расположенная среди каменных россыпей и выходов скал.

Вследствие избыточного увлажнения территории площадь болот на Кольском Севере сопоставима с площадью тундровой зоны. Распределены болота неравномерно: на западе в горной местности они приурочены к долинам рек и озер, иногда встречаются на вершинах гор и на склонах. Основная часть болот расположена в юго-восточной части региона (приложение 1, рис. 4).

Болота отличаются разнообразием типов и сообществ, произрастающих на них. Влияние болот на формирование химического состава поверхностных вод носит локальный характер.

1.4.6. Гидрографические особенности

Сложность геологических и орографических условий, наличие кристаллического водоупора, значительное преобладание осадков над испарением повлияли на характер гидрологической сети. Она весьма развита, реки принадлежат бассейнам Баренцева и Белого морей и относятся к трем основным группам: полуравнинные, озерного типа и горные. Многие реки представляют собой озерно-речные системы (Каталог рек Мурманской области, 1962; Ресурсы, 1970).

Реки Кольского Севера имеют преимущественно снеговое питание. Внутригодовой режим стока характеризуется высоким весенним половодьем, низкой зимней и летней меженью и относительно небольшими летне-осенними подъемами, вызываемыми дождями. Характерно значительно

преобладание весеннего стока над летним и небольшое – летне-осеннего над зимним.

Пространственное распределение стока повторяет климатические и рельефные особенности территории (приложение 1, рис. 5).

Зональное уменьшение слоя стока, обусловленное уменьшением количества выпадающих осадков и увеличением испарения, наблюдается с севера на юг и от побережья вглубь территории. Наибольшей величины сток достигает на горных массивах в центре.

Годовой сток рек северного побережья составляет около 20 л/с км² или 630 мм, южного – 12-13 л/с км² (380-410 мм), в центре региона 9-10 л/с км² и в горных районах превышает 25-30 л/с км² (800-950 мм). Гидрологическое районирование Кольского региона отражает особенности внутригодового распределения стока – территория разделена на 4 района.

Озера. Всего на Кольском Севере расположено 107146 озер, занимающих 6,3 % территории. Средняя плотность озер - 1 озеро на 1 км², наибольшая - характерна для центральной и северной частей территории, где коэффициент озерности водосборов некоторых рек (Ура, Умба, Дроздовка, Колвица, Нива и другие) достигает 10-20 %. 99,2 % озер имеют площадь зеркала менее 1 км² (табл. 2) (Каталог озер..., 1962).

Таблица 2. Количество озер и площадь их зеркал (Ресурсы, 1970).

Градации озер по площади зеркала, км ²	Количество	Площадь, км ²	Процентное распределение	
			от общего количества	от общей площади
Менее 1	106 311	2998	99,2	33,6
1-10	763	1911	0,8	23,4
10-50	58	1071	-	13,1
50-100	10	770	-	9,3
100-1000	4	1446	-	17,6
Всего	107 146	8195	100	100

Большая часть озер имеет ледниковое происхождение. Эти озера округлой формы и неглубокие (до 4-6 метров), расположенные в

заболоченной местности. Озера тектонического занимают глубокие котловины, имеют вытянутую форму и сложную конфигурацию береговой линии. Рельеф дна неровный перемежающийся с впадинами до 100 метров. К таким типам озер относятся наиболее крупные водоемы Кольского региона (Имандра, Умбозеро, Ловозеро и другие) (Каталог озер, 1962; Ресурсы, 1970).

Термический режим воды озер характеризуется следующими особенностями. В период летнего прогрева температура воды имеет равномерное распределение по акватории. Разность температур между отдельными частями озер в этот период не превышает 2-2,5 °. В августе водоемы постепенно теряют тепло, накопленное за весенне-летний период. Осенью охлаждение водной поверхности происходит равномерно по всей поверхности водного зеркала. Средняя месячная температура воды в течение теплого сезона в целом на 1-3 ° выше температуры воздуха. Однако, в начале весеннего прогрева воды температура воздуха на 0,5-1 ° превышает температуру водной поверхности. Распределение температуры воды в открытых частях небольших водоемов описывает схожую картину, наблюдающуюся у берегов.

Формирование термического режима по глубине отличается следующими особенностями. В период поступления талых вод и вскрытия ввиду небольших глубин происходит быстрый переход от зимнего распределения температуры к весенней гомотермии. На малых озерах и на участках больших озер с глубинами до 5-10 метров, благодаря быстрому прогреванию водных масс и ветровому перемешиванию, через 2-4 дня после вскрытия устанавливается гомотермия до начала ледостава.

В водном балансе малых озер ключевую роль играют атмосферные осадки, составляющие более 70 % приходной части баланса.

1.4.7. Подземные воды

Режим подземных вод определяется климатическими условиями Кольского региона гидрогеологическими и геоструктурными особенностями Балтийского кристаллического щита (Ресурсы, 1970). На данной территории

распространены порово-пластовые воды рыхлых четвертичных отложений и трещинные воды кристаллических пород.

Подземные воды, приуроченные к рыхлым отложениям - поровые, со свободной поверхностью, безнапорные (встречаются слабонапорные) и напорные (главным образом, в межгорных впадинах). Глубина залегания уровня этих вод, как правило, составляет 0,5-5,0 м, и связана с рельефом местности - наиболее глубокое залегание уровня на возвышенных участках, наименее глубокое - в понижениях. Мощность водоносного горизонта, в среднем, составляет 5-10 м. Наиболее значительные мощности отмечаются в пределах межгорных впадин, где они могут достигать 100 м и более (Даувальтер, 2005).

Основной источник питания подземных вод – атмосферные осадки. Осадки, выпадающие на поверхность коренных пород, стекая по поверхности, заполняют трещиноватые зоны. В сильно трещиноватых зонах (Хибинские и Ловозерские тундры) процессы фильтрации ускоряются, создавая тем самым благоприятные условия формирования подземного стока (Антонов, 1964; Рельеф и геологическое строение, 1964). В зонах, где коренные породы перекрыты четвертичными отложениями происходит инфильтрация через песчаные грунты, что способствует образованию водоносных горизонтов. Ослабление процессов инфильтрации имеют место на глинистых породах или мощных торфяных почвах. Кроме того, пополнение запасов подземных вод происходит вследствие поступления артезианских вод по трещинам из более глубоких коренных пород. В горных районах глубоко врезанные долины являются постоянно действующими местами разгрузки подземных вод и питают реки.

Именно благодаря хорошо развитой гидрографической сети и наличию глубоких эрозионных врезов на значительной части территории Кольского Севера наблюдается хорошая гидравлическая связь поверхностных и подземных вод.

1.5. Уровень антропогенной нагрузки

Северные регионы (арктические и субарктические) более уязвимы к антропогенному воздействию вследствие замедленных процессов массообмена, энергообмена и самоочищения. Загрязнение акваторий происходит вследствие освоения минерально-сырьевых ресурсов в регионе в совокупности с трансграничным переносом загрязняющих веществ (Моисеенко, Гашкина, 2010).

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.

Среди горнорудных предприятий наибольшую значимость представляют медно-никелевые производства (комбинаты «Печенганикель» и «Североникель»), которые функционируют с конца 50-х годов и выбрасывают в атмосферу большие количества кислотообразующих веществ и металлов (рис. 6). На северо-западе региона расположен мощный загрязнитель – горно-металлургическое производство медно-никелевых руд комбинат «Печенганикель» (г. Заполярный и г. Никель). Горно-металлургический комбинат полного цикла «Североникель» (г. Мончегорск), расположен в озерной котловине и с запада, востока и юга защищен невысокими хребтами. До 1960 гг. комбинат работал на местных медно-никелевых рудах, но с 1965 года перешел на руды Талнахского месторождения, отличающегося более высоким содержанием серы, что не могло не сказаться на изменении кислотности атмосферных осадков.

Меридиональный центр охватывает долины р. Колы, оз. Имандра и р. Нивы, где функционируют предприятия горнодобывающей и химической промышленности, цветной и черной металлургии. Эта территория также подвержена техногенному загрязнению, так как внутри нее расположена промышленные предприятия Оленегорска, Кировска, Апатит и Кандалакши (ОАО «Апатит», «Олкон», Кольская АЭС, Ловозерский ГОК, Кандалакшский

алюминиевый завод, а также образованные ими города и поселки). Юго-западный центр включает в себя железорудные и другие предприятия Ено-Ковдорского промышленного узла, которые также вносят свой вклад в аэротехногенное загрязнение территории Кольского региона.

Особенность состава выбросов предприятий на территории Кольского Севера заключается в том, что эмиссия кислотообразующих веществ «сопровождается выбросами пылевых частиц, которые в пределах локальных зон нейтрализуют кислотность выпадающих осадков» (Моисеенко и др., 2000; Моисеенко, 2003). Эта закономерность показана на примере металлургических комплексов «Североникель» и «Печенганикель».

Аэротехногенное загрязнение пылевыми частицами способствует формированию неблагоприятной обстановки в городах Кировск, Апатиты, Ковдор и Оленегорск. Горно-обогатительные комбинаты, расположенные в этих городах, выбрасывают в атмосферу большое количество пыли, что отрицательно сказывается на окружающей среде и, особенно на качестве воздуха (Макарова и др., 1996). Формирование отвалов и карьеров, из которых выщелачиваются химические элементы приводит к изменениям в водных экосистемах (Красовская, 1990).



Добыча

- железных руд
- медно-никелевых руд
- апатито-нефелиновых руд
- слюды
- пегматита

Выплавка

- никеля и меди
- алюминия

Рис. 6. Центры техногенного загрязнения на территории Кольского региона (Доклад о состоянии..., 2013)

В настоящее время два комбината «Печенганикель» и «Североникель» являются источниками эмиссии диоксида серы и тяжелых металлов (рис. 7). По данным Moiseenko (1994) в начале 1980-х годов около 70% территории Кольского Севера было подвержено аэротехногенному

загрязнению SO_2 . 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). Несмотря на это, водные объекты, считавшиеся фоновыми до периода интенсивной антропогенной нагрузки, в настоящее время продолжают подвергаться аэротехногенному воздействию.

По сравнению с периодом 1985-1988 гг. интенсивность выпадений техногенной серы в 2008-2009 гг. сократилась в 1.8 раза и составила 275 кг/км^2 , нитратного азота – примерно в 2.2 раза, концентрация техногенных сульфатов в зоне влияния комбинатов составила 1200 кг/км^2 в год (Обзор..., 2010). Данные сети станций комплексного фоновоего мониторинга (СФКМ) свидетельствуют о том, что в 2009 г. среднегодовые фоновые концентрации сульфатов не превышали для ЕТР (5 мкг/м^3) – это в биосферных заповедниках. В среднем для ЕТР отмечена стабилизация концентраций в последние 10 лет, после их уменьшения в предыдущие годы. Та же тенденция отмечена и для диоксида серы (рис. 7). Поступление техногенных сульфатов происходит не только с жидкими, но и с твердыми осадками.

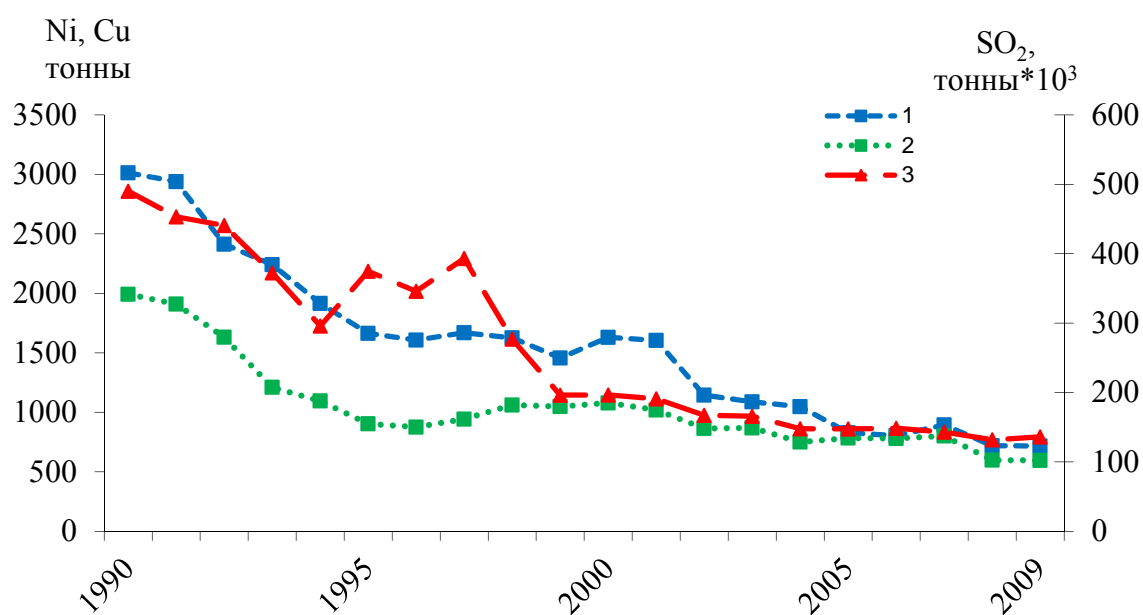


Рис. 7. Выбросы в атмосферу: 1 - Ni (тонн/год), 2 - Cu(тонн/год) и 3 - SO_2 (тыс. тонн /год) в период 1990-2009 гг.

Загрязнение территории Мурманской области носит локальный характер (Обзор, 2010). Наиболее интенсивные аномалии тяжелых металлов и серы приурочены к городам Мончегорск и Заполярный, Никелю. Устойчивое загрязнение наблюдается в районе пгт. Никель, захватывая часть Норвегии. В юго-западной части наблюдается снижение уровня концентрации загрязняющих веществ в районе финско-российской границы (принят за условно-фоновый уровень) и практически отсутствует на территории Финляндии. Особенность распространения аэротехногенных потоков связана с преобладанием ветров меридионального направления, причем распространению загрязнения в западную часть региона препятствуют горные хребты Монча, Волчи и Сальные тундры. В Восточной части территории загрязнение носит региональный характер и простирается на дальние расстояния.

Территория Кольского Севера подвержена активному влиянию циклонов, перемещающих воздушные массы с территории Западной Европы на европейскую часть России. Ежегодное трансграничное поступление SO_4 на территорию Кольского Севера составляет $1,8 \text{ т/км}^2$, H_2SO_4 – $1,26 \text{ т/км}^2$. Согласно оценкам ряда наблюдателей, вклад трансграничного переноса в загрязнение Кольского Севера соединениями серы составляет 60 % (Свэлле, Калабин, 1994). Общее выпадение металлов за сутки в западной части региона в 10 раз превышает минимальное содержание для всей территории Кольского Севера. Среднее содержание SO_4 в атмосферных осадках в сутки составляет $7,2 \text{ мг/л}$. (Израэль и др., 1989; Моисеенко и др., 2000).

Богатство природно-сырьевых ресурсов Кольского Севера обусловили высокую концентрацию предприятий горнорудной и металлургической промышленности (ПДоклад..., 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 неметаллорудное сырье - флогопит и вермикулит, мусковит, кварц-полевошпатовое сырье (Пожиленко и др., 2002), которые при взаимодействии с кислотными осадками могут способствовать усилению миграционных свойств элементов в воды озер. Медно-никелевые руды вносят первостепенный вклад в загрязнение водных объектов и преимущественно сосредоточены в районе г. Заполярный (комбинат «Печенганикель»). Около 70 % запасов медно-никелевых руд сосредоточены на Ждановском месторождении. Они представлены сульфидными медно-никелевыми месторождениями, причем занимают второе место по производству никеля в России после норильских руд. Руды, расположенные в районе г. Мончегорск (комбинат «Североникель») представлены в виде примесей и распространены очагово. Большую значимость представляют фосфатные руды, представленные комплексными апатитонефелиновыми рудами Хибинского массива и комплексными апатитомагнетитовыми рудами Ковдорского железорудного месторождения. Сырье, содержащее алюминий представлено запасами нефелина, ценность которого определяется содержанием в нем окислов натрия, калия, галлия, рубидия, цезия и бериллия. Титансодержащее сырье содержится в апатитонефелиновых рудах Хибинского массива, рудах Африкандского месторождения, комплексных рудах Колвицкого месторождения, Себлявр, Лесная Варака. В их состав также входит медь, тантал, ниобий, железо, редкие земли (Доклад..., 2014).

Загрязнение территории Мурманской области носит локальный характер (Обзор, 2010). Наиболее интенсивные аномалии тяжелых металлов и серы приурочены к городам Мончегорск и Заполярный, Никелю. Устойчивое загрязнение наблюдается в районе пгт. Никель, захватывая часть Норвегии. Города Ковдор, Оленегорск, Кировск, Кандалакша, Апатиты также вносят существенный вклад в промышленную составляющую Мурманского административного региона. В юго-западной части наблюдается снижение уровня концентрации загрязняющих веществ в районе финско-российской

границы (принят за условно-фоновый уровень) и практически отсутствует на территории Финляндии. Особенность распространения аэротехногенных потоков связана с преобладанием ветров меридионального направления, причем распространению загрязнения в западную часть региона препятствуют горные хребты Монча, Волчи и Сальные тундры. В Восточной части территории загрязнение носит региональный характер и простирается на дальние расстояния, но в данной работе эта территория не была исследована. Несмотря на то, что загрязнение водных объектов носит локальный характер, природные арктические условия препятствуют быстрому самоочищению объектов. В связи с тем, что водные объекты испытывают постоянную нагрузку от промышленных предприятий и населенных пунктов загрязнение носит перманентный характер (Обзор..., 2010).

Территория Кольского Севера подвержена активному влиянию циклонов, перемещающих воздушные массы с территории Западной Европы на европейскую часть России. Ежегодное трансграничное поступление SO_4 на территорию Кольского Севера составляет $1,8 \text{ т/км}^2$, H_2SO_4 – $1,26 \text{ т/км}^2$. Согласно оценкам ряда наблюдателей, вклад трансграничного переноса в загрязнение Кольского Севера соединениями серы составляет 60 % (Свэлле, Калабин, 1994). Общее выпадение металлов за сутки в западной части региона в 10 раз превышает минимальное содержание для всей территории Кольского Севера. Среднее содержание SO_4 в атмосферных осадках в сутки составляет $7,2 \text{ мг/л}$. (Израэль и др., 1989; Моисеенко и др., 2000).

Таким образом, изменение химического состава вод происходит в результате совокупного воздействия природных и антропогенных процессов. Увеличение уровня содержания металлов в природных водах в результате локальной и региональной антропогенной нагрузки может приводить к изменению биогеохимических циклов и формированию экотоксичных условий для водных организмов.

Глава 2. Характеристика объектов. Материалы и методы.

2.1 Информационная основа

Изучение изменений химического состава вод, связанное с глобальными изменениями окружающей среды и аэротехногенного загрязнения водосборов, ведется с конца 1980-х гг. Международная кооперативная программа «International cooperative program on Assessment and Monitoring of Acidification of Rivers and Lakes» (ICP-Water), объединившая многие страны, включая Россию, была основана в 1986 году. Норвежский Институт Водных ресурсов (NIVA) является программным центром ICP Waters. Целью этой программы является исследование влияния кислотных дождей и загрязнения воздуха на водные объекты. В программе принимают участие 20 стран (18 европейских, США и Канада). Данные мониторинговых наблюдений необходимы для документирования последствий трансграничного загрязнения воздуха. Результаты оценок изменения химического состава вод и биологических показателей освещены на ежегодных заседаниях.

Первые рекогносцировочные исследования озер в России были проведены в 1990 году. С 1995 года в России ведутся широкомасштабные исследования малых озер в рамках проекта «Survey Lake» совместно с северными странами: Норвегией, Швецией, Финляндией, Данией и Англией для оценки последствий аэротехногенного загрязнения на качество водных объектов. Всего в рамках проекта было исследовано 460 малых озер. Для выявления долговременных тенденций изменений химического состава вод было в 2000 и 2009 гг. исследования были продолжены, но уже по сокращенной программе. Тогда было исследовано около 100 озер (Моисеенко, Гашкина, 2010).

Для исследования долговременных тенденций изменения химического состава вод была использована гидрохимическая база данных по 75 малым озерам Кольского Севера за периоды 1990, 1995, 2000, 2005 и 2009 г, которые точно повторялись 1 раз в 5 лет. В 2005 году в рамках международной

программы ICP-Water был выполнен полный химический анализ (было определено более 70 показателей) по малым озерам Кольского Севера. Поэтому, для оценки процессов закисления и миграции элементов в воде озер этот год был взят в качестве «модельного».

2.2 Объекты исследования

В исследования включались озера, не подверженные каким-либо прямым источникам загрязнения, площадь водного зеркала которых не более 20 км². Чтобы свести к минимуму влияние межгодовых и сезонных вариаций, отбор проб проводился в сжатый временной интервал позднего осеннего охлаждения, когда вегетационные процессы незначительны, устанавливается гомотермия и отсутствует стратификация. Соблюдение этих условий рекомендовано в проектах «Survey lakes», которые проводятся раз в 5-10 лет в Европе и Северной Америке для выявления влияния воздушных переносов загрязняющих веществ на озерные системы, включая кислотообразующие газы - SO₂ и NO_x (Kvaeven et al., 2001).

При отборе и выборе репрезентативных данных принимались во внимание следующие особенности (Моисеенко, Гашкина, 2010):

1. Морфометрические характеристики озер. Ввиду того, что объекты исследования – малые озера автономных ландшафтов, в питании которых определяющую роль играют атмосферные осадки (до 70 % в водном балансе), выбранные озера обладают малыми площадью акватории (0,04 – 7 км²) и удельного водосбора, небольшими глубинами (4–6 метров), малой проточностью. Исследованные малые озера составляют около 0,1 % от всех озер Кольского Севера.
2. В исследования не включались озера, в которые осуществлялось непосредственное поступление сточных вод (Henriksen et.al, 1998; Moiseenko, 2013).
3. Единовременность и сопоставимость результатов по гидрологическим сезонам. Чтобы свести к минимуму влияние межгодовых и сезонных вариаций, отбор проб проводился в сжатый временной интервал

позднего осеннего охлаждения, когда вегетационные процессы незначительны, устанавливается гомотермия и отсутствует стратификация.

2.3 Методы исследования

2.3.1 Методы аналитических измерений

Определение химического состава вод выполняли по единым методикам в соответствии с рекомендациями (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 $\Sigma_{\text{кат.}}$ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}), щелочности (Alk), SO_4^{2-} , Cl^{-} , цветности (Цв), содержание растворенного органического вещества (POB), общего азота и фосфора (TN и TP).

Верификация аналитических методов и результатов определения химического состава вод осуществлялась по единой системе стандартных растворов при постоянном жестком внутрилабораторном контроле; корректность получаемых результатов подтверждена в ходе международной интеркалибрации (Intercomparison, 2005).

Для контроля качества измерений pH, Alk, концентраций Cl^{-} , SO_4^{2-} , щелочных и щелочноземельных элементов использовали специализированный компьютерный пакет ALPEFORM, включающий в себя оценку баланса ионов, основанной на контроле измеренной и расчетной электропроводности, электронейтральности с учетом содержания органического вещества (Wathne and Mosello, 1998). Содержание органического вещества ХПК_{Mn} определялось по перманганатной окисляемости (ПО), затем рассчитывалось содержание растворенного углерода (Сорг.) по полученным зависимостям для вод Норвегии и Кольского Севера: $\text{Сорг.} = 0.764 \times \text{ХПК}_{\text{Mn}} + 1.55$.

Концентрации микроэлементов (более 60) элементов определялись методом индуктивно связанной плазмы на масс-спектрометре Plasma Quad-3

фирмы Fisons Instruments Elemental Analysis (производство Великобритании) в лицензированной лаборатории Санкт-Петербурга. Элементы, значения которых были ниже порога аналитического обнаружения: Te, Hg (с порогом обнаружения $<0,05$ мкг/л), Ge, Ru, Pd, Hf, Os, Ir, Pt, Au, Sm, Eu, Dy, Er, Yb, Lu (с порогом обнаружения $<0,02$ мкг/л), Rh, Ta, Tl, Tb, Ho, Tm (с порогом обнаружения $<0,01$ мкг/л) не включались в рассмотрение.

2.3.2 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».

Для исследования взаимодействия пород, слагающих водосборы и воды озер с целью оценки миграции элементов в системе «вода-порода» был рассмотрен коэффициент водной миграции по А.И. Перельману (1989). Он рассчитывается как отношение содержания элемента в минеральном остатке воды (w , %) к его содержанию в горных породах (r , %). Этот коэффициент отражает интенсивность водной миграции, определяемую свойствами самого элемента, а также степень их концентрации или рассеяния в поверхностных водах суши. Расчет коэффициентов водной миграции элементов осуществлялся по отношению к кларкам тех пород, к которым приурочены озера, что позволило получить более точные региональные характеристики, а также выделить универсальные закономерности.

Целью применения факторного анализа являются сокращение переменных и определение структуры взаимосвязей между переменными (классификация переменных). Сокращение данных позволяет уменьшить число исходных значений (переменных) до минимального значения, путем выделения скрытых общих факторов, связывающих эти переменные. Идея заключается в тесноте расположения переменных относительно друг друга (то есть парная корреляция), которые объединены в один фактор (Гореева и др., 2007; Халафян, 2007).

Для оценки вклада фактора в процесс формирования химического состава вод был проведен факторный анализ методом главных компонент (общепринятый и чаще применяемый метод). Дисперсии всех переменных по умолчанию равны 1. Общая дисперсия равна общему числу переменных. Максимально возможное число выделяемых факторов равно числу переменных. Каждому фактору соответствует дисперсия, объясненная этим фактором. Эти дисперсии называются собственными значениями. Другими словами, % объясняемой дисперсии характеризует значимость того или иного фактора – чем больше значение, тем больше вклад этого фактора. Факторные нагрузки есть корреляции между переменными и выделенными факторами. С увеличением номера фактора значения коэффициентов корреляции уменьшаются. При правильно выбранном количестве факторов таблицы факторных нагрузок должны выявлять закономерности, проявляющиеся в следующем. Факторные нагрузки должны объединять переменные в группы таким образом, чтобы коэффициенты корреляции принимали большие значения по одной группе и меньшие значения по другой (Гореева, 2007).

Значимыми факторными нагрузками в настоящей работе были те, квадрат коэффициента корреляции которых был больше 0,5. Для установления взаимосвязей между компонентами микроэлементного состава в воде озер и выявления особенностей группирования элементов была рассчитана корреляционная матрица и выполнен факторный анализ. Корреляционная матрица была составлена для всей группы исследованных элементов. Для факторного анализа были выбраны основные элементы (Al, Fe, Cu, Ni, Zn, Mn, Pb, Cd, As, Se, Rb, Sb, Ti, V, Re, Y, Nb, Bi, La), концентрации которых были наиболее значимы и имели вариабельность в выделенных субрегионах. Основные показатели водной среды (pH, Σ кат, Alk, SO₄, P, POB, ANC) также были введены в факторный анализ.

2.3.3. 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).

Остатки измельченных образцов были просеяны последовательно через геологические сита фракцией 2-1, 1-0,5, 0,5-0,25, 0,25-0,1 и <0,1 мм. Из фракции 0,1-0,5 мм отбирали навески исследуемых горных пород для экстракции. Подготовку проб к анализу проводили методом отмывания дробленной фракции пород в воде с использованием ультразвукового диспергатора УЗДН-1 для очистки дробленого материала от пылевидных частиц.

Эксперимент проходил по одной схеме с двумя разными растворами: 1) нейтральная среда (фоновые условия) - дистиллированная вода (рН = 6,5), 2) кислая среда - разбавленная серная кислота (раствор серной кислоты) (рН = 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).

Отделение раствора от породы после опытов производилось путем фильтрования под вакуумом (размер пор 0,05 мкм) с помощью водоструйного насоса, что позволяло извлекать ~ 95% жидкости. Заливалась

новая порция жидкости до метки на стенке пробирки и процесс продолжался. До определения элементарного состава пробы хранились в холодильнике. Извлеченные растворы анализировались на pH (потенциометрия). Определение макро и микроэлементного состава вод проводилось с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) на 1, 3, 5 и 7 недели экспериментальных исследований.

Определение pH

Измерение значений pH производилось с помощью прибора ЭКСПЕРТ – 001, пределы погрешности составляют ± 0.03 единицы измерения. Время ожидания установления показаний pH варьировалось от 30 с до 1 минуты. После записи показаний электрод промывался дистиллированной водой. Перед каждым опытом электроды калибровались стандартными буферами согласно рекомендациям, принятым при разработке метода.

Причины расхождения полученных результатов с природными процессами подробно описаны в работе (Sapsford et al., 2009). Изменение pH отражает особенности выщелачивания элементов из пород в разных условиях среды. Понижение pH вызывает увеличение концентраций растворенных металлов, т.е. происходит загрязнение вод. Это скорее всего связано с различиями физико-химических условий, таких как скорость фильтрации, температура, скорость поступления кислорода, скорость накопления вторичных минералов, распределение частиц по размеру, наличие свежих поверхностей (при дроблении). В экспериментах измеряется обычно скорость перехода в раствор элементов, причем нормируется она не к площади поверхности минерала-источника (ее трудно определить), а к массе всего образца. В случае перехода элемента в раствор в результате реакции инконгруэнтного растворения минерала (т.е. переход их твердой фазы в жидкую), некоторое количество этого элемента может входить в состав вторичных минералов. Тогда скорость перехода элемента в раствор будет ниже скорости выветривания (исчезновения) первичного минерала,

содержащего этот элемент. Вторичные минералы образуются обычно на поверхности первичных и вызывают пассивацию (антикоррозию) их поверхности. Этот процесс более выражен в природных условиях вследствие большей его длительности.

Определение концентрации элементов

После недельной обработки пробы подкислялись 1 мл азотной кислоты, тщательно перемешивались и до определения элементарного состава хранились в холодильнике.

Атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP AES) проводилась на спектрометре Iris Intrepid Duo (Thermo Elemental, USA). Анализируемый раствор вводился в виде аэрозоля в потоке аргона и ионизировался в индуктивно-связанной плазме. Оптический линейчатый спектр излучения атомов и ионов пробы регистрировался одновременно на CID (Charge Injection Device) детекторе. Оптический диапазон прибора – 165-1050 нм. Содержания элементов определялись с использованием 23-элементного стандартного раствора ICP Multi Element Standard IV фирмы Merck, с концентрацией элементов в нем 1000 ± 10 мг/л, и 68-элементного стандартного раствора ICP-MS-68A, HPS (части А и Б) с концентрацией 10 мг/л. Градуировочные растворы готовили последовательным разбавлением стандартных растворов до 0.005, 0.01, 1.20 мг/л соответственно. Пределы обнаружения для различных элементов варьируют в диапазоне от 0.001 мг/л до 0.01 мг/л. Погрешность измерения составляет 0.1–1 и 1–10 отн. % при содержаниях элементов соответственно больше и меньше 0.1 мг/л.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) проводилась на масс-спектрометре высокого разрешения Finnigan Element XR. Анализируемый раствор вводился в масс-спектрометр в потоке аргона в виде аэрозоля и ионизировался в индуктивно-связанной плазме. Разделение ионов осуществлялось анализатором с двойной фокусировкой, магнитной и электростатической. Детектирование ионов производилось электронным

умножителем, сохраняющим линейность в диапазоне от 1 до 10^{10} ионов в секунду. Калибровка чувствительности прибора по всей шкале масс осуществлялась с помощью стандартных 71 - элементных растворов, включающих все анализируемые в пробах элементы. Для расчета концентраций элементов использовалась серия калибровочных растворов, приготовленных из стандартного раствора с диапазоном концентраций 0.05-5 мкг/л. Для контроля качества измерений и учета дрейфа чувствительности прибора анализы проб чередовались с анализами стандартного образца с периодичностью 1:10. Погрешность анализа составила 1-3 отн.%. Пределы обнаружения представлены в таблице 3.

Таблица 3. Пределы обнаружения элементов методом ICP-MS, в мкг/л

Na	2.56	Sr	0.03	Sm	0.00085
Mg	4.35	Li	0.00375	Eu	0.00073
Al	0.77	Ba	0.03817	Gd	0.00066
Si	14.40	Be	0.00425	Tb	0.00019
P	15.90	Rb	0.00557	Dy	0.00042
S	15.19	Y	0.00242	Ho	0.00011
K	4.88	Zr	0.00432	Er	0.00027
Ca	6.17	Nb	0.00155	Yb	0.00032
Sc	0.08	Mo	0.01756	Lu	0.00016
Ti	0.66	Sn	0.01385	W	0.02134
V	0.07	Sb	0.00262	Re	0.00028
Mn	0.03	Cs	0.00036	Pt	0.00075
Co	0.08	La	0.00259	Tl	0.00026
Fe	3,66	Ce	0.00329	Th	0.00080
Ga	0,04	Pr	0.00054	U	0.00040
As	0,07	Nd	0.00163		

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

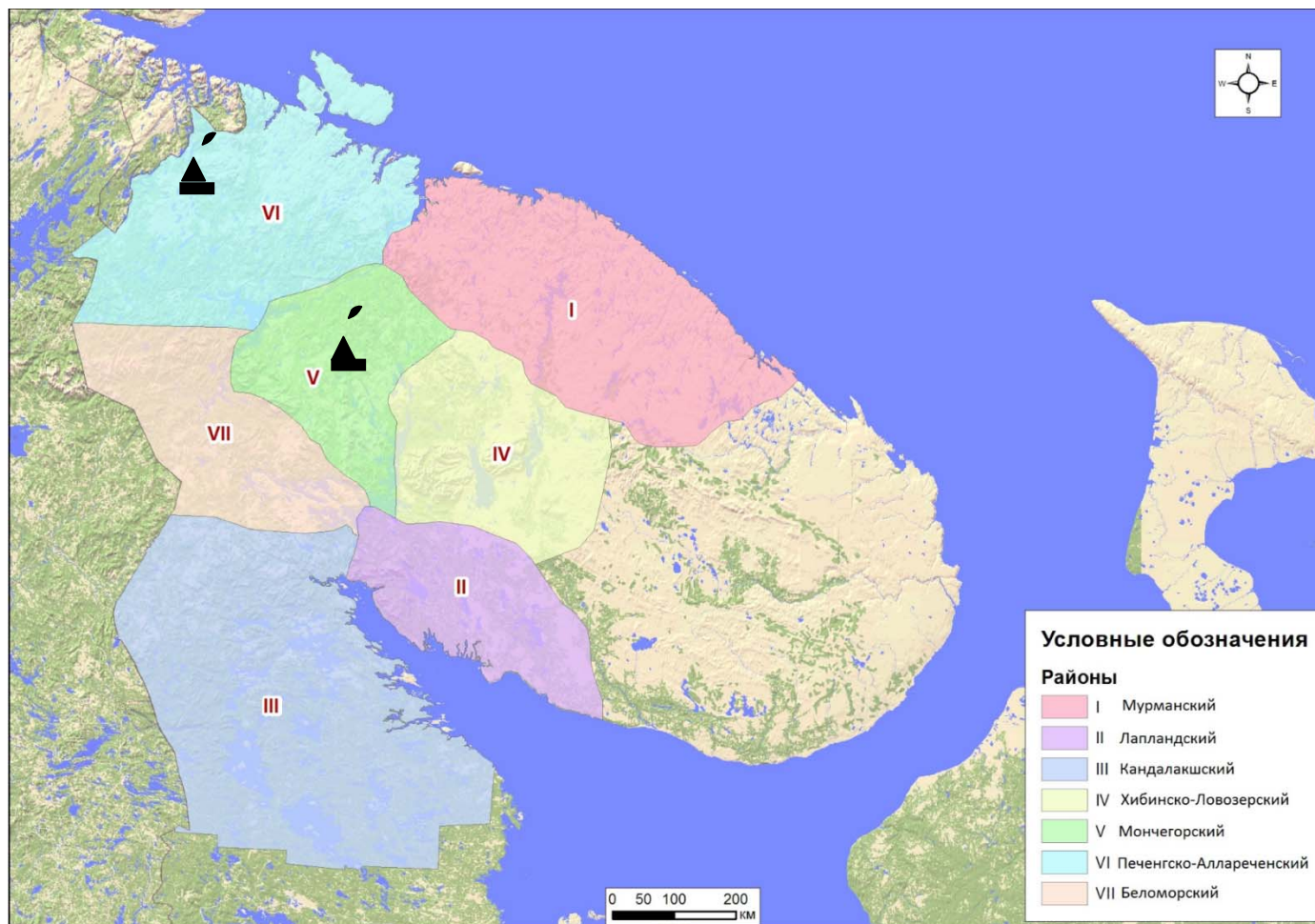
Химический состав воды малых озер обусловлен влиянием физических, химических и биологических факторов. Алекин О.А. (1970) выделяет прямые факторы, обуславливающие непосредственное поступление в озера химических элементов (горные породы, почвы, атмосферные осадки, живые организмы, антропогенная деятельность) и косвенные факторы (климатические особенности, рельеф), совместное влияние которых регулирует и трансформирует воздействие прямых факторов. Антропогенный фактор, накладываясь на природные процессы, вносит существенный вклад в формирование химического состава вод (Моисеенко, Гашкина, 2010).

Исследованные озера Кольского Севера приурочены к районам распространения магматических и метаморфических пород Балтийского щита, которые охватывают тундровый и таежный регионы. Геологическая структура Кольского региона достаточно разнообразна, что определяет высокую вариабельность химического состава вод. Ландшафтные условия, такие как соотношение площадей водосбора и озера, высота над уровнем моря, залесенность и заболоченность способны усиливать или буферировать процессы закисления вод. От дренируемости территории зависит степень ее заболоченности, от твердости пород и степени их насыщенности обменными основаниями зависят буферные свойства вод. Определяющую роль в особенностях распределения элементов в воде озер играет геологическая структура. Геохимические особенности пород, слагающих Кольский регион достаточно разнообразны, что непосредственно сказывается на поведении и распределении элементов в природных водах.

Ландшафтные и геохимические особенности пород, слагающих Кольский Север достаточно разнообразны. Здесь сосредоточены богатые и

разнообразные месторождения полезных ископаемых. 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). Также смысловая нагрузка подразумевает сходство по типу горной промышленности, географо-экономическим, административным и историко-социальным признакам. Совместный анализ выделенных в указанной работе структур, а также ландшафтных и геохимических особенностей региона, описанных в 3 главе, 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. 8). I и II районы находятся на некотором удалении от горно-рудных проявлений, поэтому могут считаться условно-фоновыми. В таблице 4 приведены ландшафтные и геохимические характеристики в выделенных районах Кольского Севера. В таблице 5 в выделенных регионах приведены данные по химическому составу вод озер, в таблице 6 по биогенным элементам (медиана, минимальные и максимальные значения).




 медно-никелевые комбинаты

Рис. 8. 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)

Таблица 4. Ландшафтные и геохимические характеристики выделенных районов Кольского региона (в числителе – пределы содержания, в знаменателе – среднее значение)

Район	Геологическая структура	Ландшафтные параметры					площадь водосбора, км ²	Выпадения SO ₂ , гS/м ² год
		площадь зеркала, км ²	высота над уровнем моря, м	озерность, %	залесенность, %	заболоченность, %		
I	граниты, диориты, лейкограниты	0.04-2.08	78-262	0.10-9.00	1.00-46.6	0.10-6.70	0.50-84.4	0.3-1.0
		0.83	181	2.40	9.60	4.60	10.2	
II	граниты, плагиограниты, тоналиты	0.04-126	101-209	0.10-15.0	42.9-92.9	0.10-46.8	0.52-1155	0.3-1.0
		6.65	137	3.48	41.4	23.6	74.0	
III	биотитовые, амфибол-пироксеновые гнейсы	0.04-22	6-212	0.10-21.6	37.5-91.8	7.80-22.2	51.3-315	0.7-1.5
		3.22	145	2.90	63.9	13.1	0.40	
IV	нефелиновые сиениты, граниты, гранодиориты	0.03-35.7	131-198	0.20-19.0	0.10-68.2	0.30-19.0	0.40-497	1.0-1.5
		22.5	166	3.40	42.1	9.70	51.0	
V	гнейсы, эндербиты, гранулиты	0.04-38.6	135-390	0.10-22.0	72.0-81.4	5.40-19.1	0.50-590	1.0-3.0
		4.63	210	3.70	54.1	11.9	99.2	
VI	биотитовые, амфибол-пироксеновые гнейсы	0.04-17.0	13-220	0.10-15.5	10.7-46.6	0.10-39.7	0.50-28.1	1.0-3.0
		1.8	144	6.10	30.1	18.3	306	
VII	кислые, основные гранулиты, эндербиты	0.03-15.3	73-218	0.50-16.0	0.30-84.0	14.5-23.1	0.27-299	0.7-1.5
		1.25	124	1.10	32.7	8.20	18.2	

Таблица 5. Химический состав в воде озер Кольского Севера в целом по региону и по районам (в числителе приведены медианные значения, в знаменателе – пределы варьирования)

Район	pH	χ , мкСм/см	Ca^{2+} , мг/л	Mg^{2+} , мг/л	Na^+ , мг/л	K^+ , мг/л	SO_4^{2-} , мг/л	Cl^- , мг/л	Alk, мкмольэкв/л	Цв., ° Pt-Co	POB, мкмольэкв/л	SO_4^{*2-} , мг/л	ANC, мкмольэкв/л
Кольский Север	6.48	31	2.1	0.9	1.9	0.4	2.3	1.6	123	28	6.7	2.0	126
	4.49-7.05	12-137	0.2-8.0	0.1-3.3	0.4-10.2	0.1-2.4	0.7-9.6	0.4-9.0	0-636	5-125	2.4-19.0	0.4-6.5	-10-573
I, n=10	6.15	28	1.1	0.7	3.1	0.4	1.8	4.8	57	15	4.3	1.2	92
	5.66-6.41	13-137	0.4-2.1	0.4-0.9	0.8-4.5	0.2-0.5	1.0-3.6	1.0-7.7	12-124	3-69	3.1-10.9	0.4-3.3	16-129
II, n=15	6.36	27	2.4	0.7	1.6	0.5	2.0	1.0	145	39	7.8	1.8	156
	4.78-6.95	8-101	0.2-7.2	0.1-3.3	0.5-6.5	0.1-1.6	1.2-4.1	0.7-7.3	0-286	8-125	2.8-19.0	1.1-3.9	95-441
III, n=23	6.55	34	2.8	0.7	2.8	0.5	2.4	1.8	209	35	7.4	2.2	329
	5.58-7.05	22-91	0.7-8.0	0.5-2.0	1.1-10.2	0.2-2.4	1.2-7.0	0.5-9.0	19-636	8-104	3.4-16.2	0.5-6.5	195-573
IV, n=12	6.42	22	2.1	0.5	1.3	0.3	2.3	0.8	116	12	6.4	2.1	20
	4.84-6.78	7-34	0.1-4.0	0.1-1.2	0.4-1.7	0.1-0.5	0.7-3.4	0.4-2.1	0-261	5-27	2.4-9.2	0.7-3.2	-10-64
V, n=7	5.44	47	3.3	1.1	3.5	0.4	7.1	6.6	120	15	6.2	3.8	85
	4.49-5.68	41-50	2.4-4.3	0.8-1.4	2.8-4.4	0.3-1.7	1.4-9.6	1.2-9.0	73-444	7-23	4.4-9.1	0.9-4.4	20-166
VI, n=23	6.50	27	1.6	0.6	1.7	0.4	2.1	1.4	80	92	7.1	1.7	166
	6.37-6.58	12-65	0.3-7.7	0.2-1.3	0.9-5.7	0.1-0.7	0.9-6.8	0.5-8.9	0-385	44-125	4.9-18.7	0.8-6.4	8-418
VII, n=7	6.63	35	2.8	1.0	2.9	0.4	3.3	3.8	189	26	6.6	3.1	187
	6.37-6.74	32-47	1.4-3.5	0.8-1.1	1.7-3.9	0.3-0.7	2.7-5.8	1.0-5.5	59-218	13-59	3.5-9.2	2.4-5.3	34-435

Таблица 6. Содержание биогенных элементов и органического вещества в воде озер выделенных районов (в числителе представлены медианные значения, в знаменателе – пределы варьирования)

Параметр	Кольский Север	I, n=10	II, n=15	III, n=23	IV, n=12	V, n=7	VI, n=23	VII, n=7
POB, мгС/л	6.7	4.2	7.8	7.4	6.4	6.2	6.2	6.6
	2.4-19.0	3.1-10.9	2.8-19.0	3.4-16.2	2.4-9.2	4.4-9.1	4.9-18.7	3.5-9.2
TP, мкг/л	7	6	10	6	6	7	8	5
	3-65	4-21	3-65	3-38	2-19	4-10	3-24	4-10
TN, мкг/л	223	160	282	192	206	120	246	171
	81-730	99-366	170-730	81-535	87-488	83-271	93-359	106-216
NH ₄ , мкгN/л	21	20	27	23	17	8	15	17
	3-116	9-60	3-129	3-116	7-69	4-71	2-76	11-29
NO ₃ , мкгN/л	1	1	2	2	1	1	1	1
	1-17	1-3	1-17	1-15	1-3	1-4	1-5	1-2
PO ₄ , мкгP/л	1	0	2	1	1	1	1	1
	0-29	0-3	1-29	0-28	0-3	0-3	0-3	0-2
Si, мкг/л	1.57	0.7	2.13	1.46	1.20	2.88	1.57	2.07
	0.02-3.76	2.1-2.7	0.02-3.63	0.32-3.21	0.03-3.29	2.40-3.22	0.06-3.35	1.26-3.76

3.1 Мурманский район (I)

Он охватывает северо-восточную часть региона. Тундровые ландшафты занимают большую часть выделенной территории и являются типичными для тундровой зоны всей Фенноскандии. Геологическая структура преимущественно представлена породами верхнего архея: гранитами, диоритами, лейкогранитами, гранодиоритами, монцодиоритами, плагиогранитами, эндербитами. Прибрежная полоса сложена микроклиновыми гранитами, южнее они сменяются олигоклазовыми гранитами. Коренные кристаллические породы часто выходят на поверхность. Почвы в этой зоне характеризуются как «примитивные» - тундровые иллювиально-гумусовые оподзоленные, торфяно-глеевые и торфяно-болотные со сфагновым и травяным торфом. Этот район среди прочих ландшафтно-геохимических районов Кольского региона выделяется минимальной залесенностью (поскольку расположен в тундровой зоне) и заболоченностью. В Мурманской области известно десять месторождений глин и суглинков с общими запасами 14 млн. м³. Самыми крупными рентабельными считаются Кильдинское

и Териберское. На границе с Оленегорским районом ведется добыча железистых кварцитов. Местами отмечены проявления меди, свинца и серебра, не имеющие практического пользования. Также известно 5 месторождений и около 40 рудопроявлений торий-уранового и уранового типов в районе р. Зап. Лица (Пожиленко и др., 2002). Выпадение антропогенной серы здесь минимальное - от 0,3 до 1,0 гS/м²год (Моисеенко, 2003). В данном районе расположены небольшие озера (средняя площадь акватории 10,2 км²) с малой площадью водосборов, поэтому ключевая роль в формировании химического состава вод принадлежит атмосферному питанию (Moiseenko, 1994; Moiseenko et al., 2013).

Воды озер относятся к хлоридно-натриевому классу вследствие влияния морских аэрозолей Баренцева моря (Алекин, 1970) с низкой электропроводностью (в среднем 27 мкСм/см) и щелочностью (в среднем 36 мкмольэкв/л). Влияние техногенных сульфатов здесь минимальное в силу отдаленности от металлургических плавильных (в среднем 1.2 мг/л). Цветность также низкая (медианное значение меньше 15 ° Pt-Co), показатель pH в среднем меняется от 5.66 до 6.41. В воде озер вследствие минимальной залесенности района и значительного удаления от аэротехногенного источника загрязнения наблюдается самое низкое содержание органического вещества, общего азота и кремния.

3.2 Лапландский район

К этому району отнесена юго-восточная часть северной тайги, где большую часть территории (22 %) занимают травяные и травяно-моховые болота. Наличие торфянистых и болотных почв обуславливают обогащение вод гумусовыми веществами. Преобладающими типами геологической структуры являются граниты, плагиограниты, тоналиты, а также кислые и основные гранулиты. К особенностям данной ландшафтно-геохимической зоны можно отнести то, что водосборы озер здесь расположены на самой малой высоте над уровнем моря. В противоположность озерам I ландшафтной зоны (северо-восточной тундровой), озера II ландшафтной зоны (юго-восточной) имеют наибольшие площади акватории и площади водосборов. В пределах района ведется добыча меди, никеля, ванадия, марганца, титана, графита, золота. Медно-никелевые

рудопроявления Лаукку, Лунгес, Ловнозерское, Элгорас прослеживаются в пределах распространения гранулитов (Минеральные месторождения..., 1981; Медно-никелевые..., 1985). Преобладающие направления ветров на территории Кольского региона таковы, что выпадение антропогенной серы, обусловленное трансграничным переносом и поступлением со стороны комбинатов «Печенганикель» и «Североникель» на территории данной ландшафтной зоны минимально, как в I районе (от 0,3 до 1,0 гS/м²год).

Озера гидрокарбонатно-кальциевого состава (Алекин, 1970), в большинстве случаев характеризуются высоким содержанием основных ионов, кислотонейтрализующей способности (95-441 мкмольэкв/л). Для озер характерно природное подкисление вод, которое обусловлено гумусовыми кислотами (цветность до 125⁰ Pt-Co). Наряду с природно-подкисленными в этой зоне распространены также антропогенно-закисленные озера (с pH<6, Цв<30⁰Pt-Co шкалы) (Моисеенко, Базова, 2016; Moiseenko et al., 2015). Для вод этого района характерны самые высокие значения общего фосфора (в среднем 10 мкг/л), общего азота (в среднем 282 мкгN/л) и растворенного органического вещества (в среднем 7.8 мгC/л), что свидетельствует об обогащении вод гумусовыми веществами.

3.3 Кандалакшский район (III)

Этот регион выделен в юго-западной части Кольского Севера. Основная часть территории покрыта лесами северной тайги, другая часть представлена лесотундровыми березняками, субальпийским криволесьем, почвы иллювиально-гумусовые маломощные. В геологическом отношении эта зона характеризуется довольно большим разнообразием пород. На севере встречаются биотитовые, амфибол- и пироксен- биотитовые гнейсы, мигматиты, тоналито-гнейсы, диориты, амфиболиты и гнейсы. Центральная часть сложена смешанными формациями: гранодиорито-гнейсами, амфиболитами, гранат-слюдяными гнейсами с кианитом и силлиманитом. Для данного района характерна максимальная из всех выделенных зон залесенность (более 60 %). Болота занимают сравнительно небольшую площадь (около 13 %), намного меньшую,

чем в других выделенных районах. Наибольшую ценность представляют месторождения мусковита и керамического сырья. На территории III района находятся крупные месторождения мусковита (листовой слюды) – Лейвойва и Риколатва. Наиболее крупные месторождения керамического сырья - Куру-Ваара, Перчатка. На территории района осуществляется комплексная добыча Cu-Ni и Pt-Pd сырья, приуроченного в основном к краевым зонам. Содержание Ni и Cu в рудоносных породах составляет 0.1-0.3 %, редкоземельных металлов и золота в среднем от 0.5 до 1.5 г/т, концентрации Pt и Pd составляют соответственно 0.42 и 5.84 г/т. Максимальное содержание приходится на благородные металлы 50-55 г/т в сульфидах (Пожиленко и др, 2002). Последние исследования, наряду с указанными месторождениями выявили наличие щелочных пород на побережье Кандалакшского залива с высоким содержанием Zr, Sr, Ba, Nb, Th, U (Акименко и др, 2014). Выпадение антропогенной серы здесь среднее для всего региона от 0.7 до 1.5 гS/м²год. Поступление антропогенной серы на данную территорию связано с аэротехногенным воздействием Ено-Ковдорского промышленного центра. Также в г. Кандалакша расположен Кандалакшский алюминиевый завод, который вносит свой вклад в аэротехногенное загрязнение территории Кольского Севера.

Озера преимущественно относятся к гидрокарбонатно-кальциевому классу (Алекин, 1970). Воды этой зоны характеризуются высоким содержанием основных катионов, показатель кислотнейтрализующей способности вод в среднем больше 300 мкмольэкв/л, рН близок к нейтральному (6.55-7.05), цветность варьирует в широких пределах (8-104⁰ Pt-Co). Здесь наблюдаются самые высокие содержания минеральных форм азота и фосфора. Это в первую очередь связано с тем, что эти показатели имеют отрицательную корреляцию с высотой над уровнем моря и положительную со степенью заболоченности и залесенности озер (Моисеенко, Гашкина, 2010).

3.4 Хибинско-Ловозерский район (IV)

В центральной части Мурманской области, в которой сосредоточены крупные промышленные предприятия и разнообразные крупные месторождения

полезных ископаемых выделен данный район. Он включает в себя Монче-тундры, Хибинские и Ловозерские тундры, которые разделены тектоническими впадинами, заняты озерами Имандра, Умбозеро и Ловозеро. Данная территория характеризуется рядом литологических особенностей, она отличается разнообразием горных пород и значительной расчлененностью рельефа. Мощность четвертичных отложений колеблется от 1-2 метров на возвышенных участках до 10 метров и более во впадинах. Хибинские и Ловозерские массивы сложены щелочными изверженными породами – нефелиновыми сиенитами и близкими к ним породами (луявриты, фойяиты, уртиты, эгириниты и др.) (Рельеф..., 1964; Герасимовский и др., 1966). Щелочные горные массивы Хибинские и Ловозерские тундры. Они характеризуются главными месторождениями Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый цирк, Эвеслогчорр и Плато Расвумчор. Почвенный покров в силу ландшафтно-геологических условий представлен «обедненными» почвами – торфяно-глеевыми и торфяно-болотными со сфагновым и травяным торфом, тундровыми иллювиально-гумусовыми оподзоленными. Зона (в ее западной части) подвержена влиянию дымовых выбросов к-та «Североникель». В связи с этим воды озер испытывают высокую техногенную нагрузку вследствие выбросов и добычи полезных ископаемых. Основными полезными ископаемыми Хибинского района (IV района) являются комплексные месторождения апатит-нефелиновых руд, в процессе добычи которых извлекаются Al, Ti, Fe, V, Rb, Cs, а также редкоземельные элементы (Минеральные месторождения..., 1981; Новые Хибинские апатитовые..., 1982). На территории этого района наряду с указанными месторождениями расположено 4 крупных месторождения железистых кварцитов. Кроме того, там существует редкометалльно-apatитовое месторождение (Пожиленко и др, 2002). Выпадения антропогенной серы оцениваются от 1.0 до 1.5 гS/м²год.

Озера в большей части района исследования имеют воды сульфатно-кальциевого состава, причем преобладание сульфатов в первую очередь обусловлено их техногенным генезисом в силу близости расположения комбината «Североникель». Воды озер характеризуются низкой электропроводностью (в

среднем 22 мкСм/см) и цветностью (в среднем 5-27⁰ Pt-Co). Для озер характерно также снижение буферных свойств вод. Вследствие распространения уязвимых пород на границе со II районом на территории данного района существуют антропогенно-закисленные озера (Моисеенко, Базова, 2016). Для них характерна низкая цветность (<5⁰ Pt-Co) и показатель pH <5, кислотонейтрализующая способность имеет отрицательные значения. В воде озер вследствие высокой твердости слагающих водосборы пород (граниты) по сравнению с щелочными, воды озер в меньшей степени обогащаются элементами.

Исключение составляют озера, расположенные в районе Хибинских и Ловозерских массивов. Было исследовано 4 озера, характеризующихся повышенным содержанием большой группы элементов. Эти озера отличаются от других озер этого района геохимическими особенностями пород и соответственно химическим составом вод. Воды озер имеют гидрокарбонатно-натриевый состав, характеризуются высокими буферными свойствами: pH>6.5, высокая электропроводность в среднем 47 мкСм/см, сумма катионов варьирует в пределах 360-520 мкмольэкв/л. Цветность находится в пределах 22-55⁰ Pt-Co, содержание органического вещества 4.4-9.1 мгС/л, что свидетельствует об устойчивости вод к процессам закисления. Содержание биогенных элементов в воде озер среднее на фоне рассмотренных районов.

3.5 Мончегорский район (V)

Район охватывает северо-восточную часть Балтийского щита в сложном участке с точки зрения тектонической составляющей. Данная территория характеризуется рядом литологических особенностей, отличается разнообразием горных пород и значительной расчлененностью рельефа. В западной части преобладающими типами пород являются: гнейсы, амфиболиты, железистые кварциты; в меньшей степени представлены габбро-амфиболиты. Среди переходных пород преобладают эндебиты, гранодиориты, монцодиониты, гранулиты и метавулканиты; встречаются гнейсы и сланцы. Для озер данного района характерны повышенная высота водосбора над уровнем моря и большая, чем в других зонах территории площадь водосбора и максимальные модули

стоков. Почвенная структура представлена торфяно-глеевыми и торфяно-болотными почвами со сфагновым и травяным торфом, подзолами иллювиально-малогумусовыми (железистые) маломощными. В г. Мончегорск расположен комбинат «Североникель» по производству меди, никеля, кобальта, который вносит большой вклад в загрязнение водных объектов. На данной территории проявляется максимальная нагрузка кислотных выпадений. Для озер данной ландшафтно-географической зоны характерны повышенная высота водосбора над уровнем моря и большая, чем в других зонах территории площадь водосбора. Главными месторождениями в районе являются Мончегорские месторождения медно-никелевых руд, расположенные в западной части района. В центральной и северо-западной частях находятся месторождения жильных руд (Ниттис-Кумужья-Травяная, Сопча). Месторождения хромитовых и титан-магнетитовых с ванадием руд Имандровой группы приурочены к массивам имандровского интрузивного комплекса (Пожиленко и др, 2002). Этот район по сравнению с другими наиболее богат месторождениями и рудопроявлениями. В процессе добычи руды, кроме никеля и меди, извлекаются кобальт, золото, платиноиды, селен, теллур и сера, с воздушными выбросами рассеиваются тяжелые металлы (Минеральные..., 1981). Вблизи г. Мончегорск освоены месторождения Cu-Ni руд Мончеплутона. Также перспективными являются массивы Cu-Ni, Pt, Cr руд. По данным Т.И. Моисеенко (2003) выпадения антропогенной серы вблизи комбината от 1.0 до 3.0 гS/м²год.

Большинство озер, расположенных в западной части района имеют воды сульфатно-натриевого состава, причем преобладание сульфатов в первую очередь обусловлено их техногенным генезисом. В восточной части района озера характеризуются сульфатно-натриевым составом, причем в данном случае происхождение сульфатов преимущественно техногенное. Высокое содержание сульфатов в воде озер обусловлено влиянием комбината «Североникель». Воды озер в силу разнообразия геологической структуры и развития заболоченных ландшафтов характеризуются низкими значениями pH (4.49-5.68) и высокими значениями цветности (от 44 до 125⁰ Pt-Co), что свидетельствует о природном

подкислении озер. Медианные значения содержания общего азота минимальны среди выделенных районов, остальных биогенные элементы находятся в пределах варьирования.

3.6 Печенгско-Аллареченский район (VI)

Район охватывает северо-западную часть региона, от Баренцева моря на севере до реки Лотта на юге. Для него характерна умеренная расчлененность рельефа с амплитудой колебания высот до 30 м, хорошо развитая озерно-речная система и высокая заболоченность. Территория расположена в зоне тундры - наиболее уязвимой в отношении атмосферных выпадений. Основным источником загрязнения является горно-металлургический комбинат «Печенганикель», расположенный в г. Заполярный, который вносит непосредственный вклад в загрязнение водных объектов. Выпадения антропогенной серы составляют для данной территории от 1.0 до 3.0 гS/м²год (Моисеенко, 2003). Геологическая структура преимущественно представлены биотитовыми, амфибол-пироксеновыми гнейсами, мигматитами, тоналито-гнейсами и гранодиорито-гнейсами. На территории района выделяют 3 крупных месторождения – Печенгское, Аллареченское и Северо-восточное (Медно-никелевые.... 1999). Основные компоненты добываемых руд - Ni, Cu, Co, S, в меньшей степени им сопутствуют – Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Se, Te (Пожиленко и др, 2002).

По классификации О.А. Алекина (1970) большинство озер в этом регионе являются сульфатно-натриевыми вследствие распространения техногенных сульфатов с дымовыми выбросами комбината «Печенганикель». Выпадения антропогенной серы составляют для данной территории от 1.0 до 3.0 г/Sm²год (Моисеенко, 2003). Озера вблизи комбината подвержены также пылевой эмиссии от комбината. Химический состав вод достаточно вариабелен: электропроводность меняется от 12 до 65 мкСм/см, щелочность от 0 до 385 мкмольэкв/л. Показатель кислотнейтрализующей способности вод озер сильно варьирует (8-418 мкмольэкв/л), что свидетельствует о способности вод озер к нейтрализации кислотных осадков. Показатель цветности в этих озерах низкий (7-23 ° Pt-Co). Воды озер вследствие высокого уровня аэротехногенной нагрузки

характеризуются повышенным содержанием растворенного органического вещества (в среднем 7.1 мгС/л), нитратов (от 1 до 17 мкгN/л) и кремния (0.06-3.35 мкг/л).

3.7 Беломорский район (VII)

Он расположен в западной лесотундровой части Мурманской области, граничащий с Финляндией. Геологическая структура представлена комплексами пород – кислыми, основными и средними гранулитами, эндербитами. На территории района хорошо развита речная сеть, территория вокруг озер и водоразделы рек заболочены, почвы преимущественно иллювиально-гумусовые маломощные. В пределах района идет активная добыча Cu, Ni, V, Ti, Mn, C, Au, графита (Пожиленко и др, 2002). Выпадения антропогенной серы составляют для данной территории от 0.7 до 1.5 гS/м²год (Моисеенко, 2003).

По классификации Алекина О.А. (1970) большинство озер, как и в VI районе являются сульфатно-натриевыми. Наряду с высоким содержанием в воде озер основных катионов и щелочности (59-218 мкмольэкв/л), здесь наблюдаются высокие концентрации техногенных сульфатов (в среднем 3.1 мг/л). Их повышенное содержание обусловлено общим высоким фоном выпадения сульфатов на водосборы этого региона.

По классификации О.А. Алекина (1970), основанной на двух принципах: преобладание ионов и соотношениях между ионами минерализации было выделено 6 групп озер (рис. 9). Большая часть озер Кольского региона относится к сульфатно-кальциевому (33 озера) типу, которые расположены в IV районе и сульфатно-натриевому (27 озер), находящиеся в V и VI районах, подверженных наибольшей техногенной нагрузке. В I и II районах 17 озер являются хлоридно-натриевыми. Гидрокарбонатно-кальциевые – (12 озер), гидрокарбонатно-магниевые (3 озера), гидрокарбонатно-натриевые (3 озера) представлены в III и VII и районах.

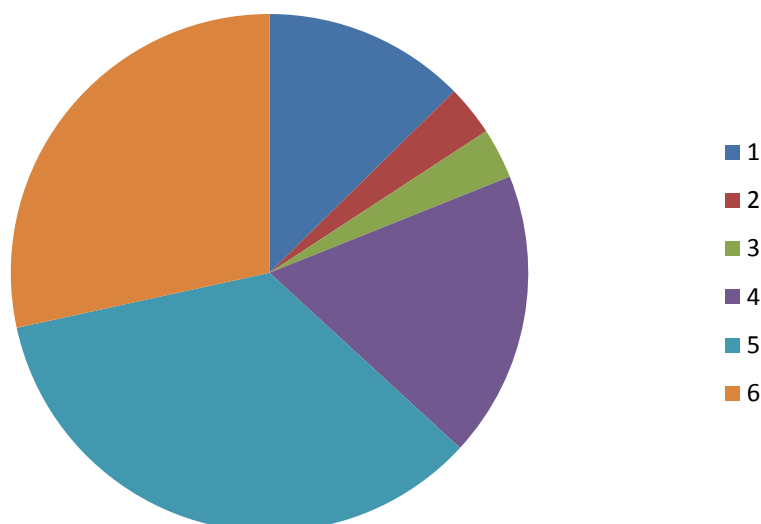
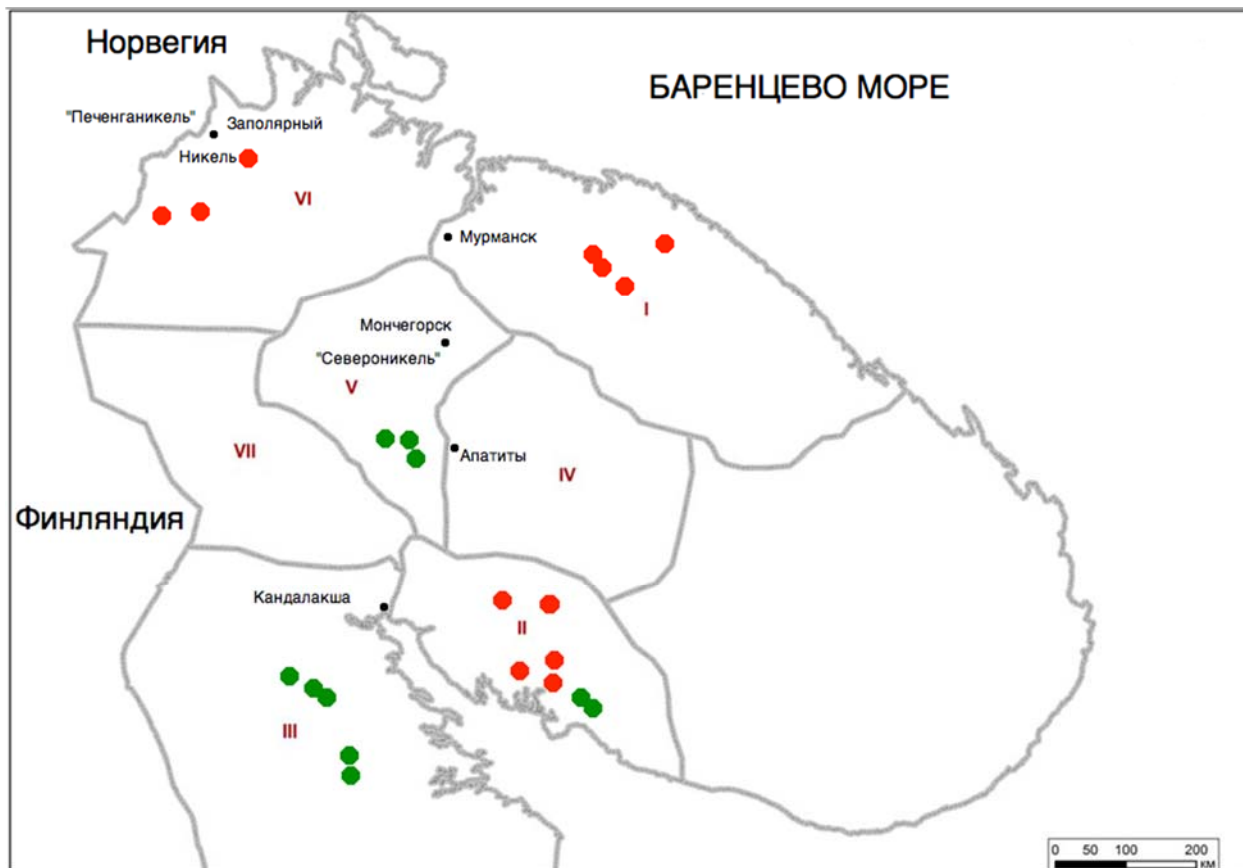


Рис. 9. Классификация озер по преобладающему катиону и аниону и соотношений между ними (по О.А. Алекину): 1 - гидрокарбонатно-кальциевые, 2 - гидрокарбонатно-магниевые, 3 - гидрокарбонатно-натриевые, 4 - хлоридно-натриевые, 5 - сульфатно-кальциевые, 6 - сульфатно-натриевые

По показателям, характеризующим степень закисления (рН и цветность) была проведена классификация озер (табл. 7). В большинстве озер Кольского Севера водная среда характеризуется как близкая к нейтральной (рН=6-7), однако цветность варьирует в широких пределах – от 10 до 100⁰Pt-Co и более шкалы. 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. Наиболее подверженными закислению являются озера, водосборы которых сложены уязвимыми к кислотным выпадениям породами гранито-гнейсовых формаций. Природное подкисление обусловлено наличием гумусовых кислот вследствие совокупного воздействия сильных минеральных и органических кислот, а также высокой степени залесенности и заболоченности территории.

Среди исследованных 97 озер, 12 можно точно отнести к антропогенно-закисленным (рН<6, Цв<30 ⁰Pt-Co шкалы, РОВ в среднем 4.9 мгС/л), тогда как к природно-подкисленным озерам – 10 озер (рН<6, Цв>60 ⁰Pt-Co шкалы, РОВ в

среднем 14.8 мгС/л). Большая часть озер (75) сохраняет буферные свойства вод, причем их расположение приурочено к породам, способным к нейтрализации кислотных выпадений. Более наглядно распределение озер по кислотным свойствам в регионе показано на рис. 10.



- антропогенно-закисленные озера
- природно-подкисленные озера

Рис. 10. Карта-схема распределения антропогенно-закисленных и природно-подкисленных озер

Таблица 7. Распределение озер (n – количество озер) в зависимости от pH и цветности вод на Кольском Севере (по данным 2005 г.)

pH	Цветность, °Pt-Со 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

Химическому составу природных вод присущи постоянные колебания, обусловленные глобальными изменениями окружающей среды и аэротехногенного загрязнения водосборов. С одной стороны, происходит влияние нарастающей антропогенной нагрузки на водные объекты, с другой – изменение климата, оказывающее воздействие на качество природных вод. Именно малые озера, имеющие преимущественно атмосферное питание, лучше всего отражают изменения химического состава вод, происходящие под влиянием аэротехногенного выпадения загрязняющих веществ на водосборы и вызванной ими трансформации геохимических циклов.

Для оценки направленности процессов формирования качества воды большое значение имеют именно долговременные ряды наблюдений. В период 1930-1980 гг. аэротехногенное загрязнение водосборов кислотообразующими веществами, органическими токсичными веществами и биогенными элементами привело к изменениям химического состава вод в следующем направлении (Moiseenko et al., 2015): увеличилась концентрация сульфатов и нитратов в воде озер; снизилась щелочность и кислотонейтрализующая способность вод; снизилось насыщение вод основными катионами; изменилось содержание органического вещества; увеличилось содержание ионных форм металлов; появились токсичные вещества и элементы.

Общей характеристикой изменения химического состава вод озер Кольского Севера за прошедшие 20 лет является снижение содержаний сульфатов как следствие сокращения эмиссии диоксида серы от Кольских комбинатов. Содержания нитратов, как отмечалось, очень низки и они не имеют вклада в закисление вод на Кольском Севере. Следует отметить, что за пределами 100 км зоны от комбинатов, на изменение химического состава вод могли также влиять трансграничные переносы загрязняющих веществ из Европы в Арктику.

3.8 Изменение основных показателей химического состава вод в зависимости от ландшафтных и геохимических особенностей региона

Учитывая естественную высокую вариабельность химического состава вод, изменения основных показателей химического состава вод были детально рассмотрены в зависимости от удаленности от комбинатов, геологических и ландшафтных условий формирования вод (табл. 8).

Таблица 8. Медианные значения основных показателей химического состава вод (в мкмольэкв/л) за 20-летний период (1990-2009) в различных районах Кольского Севера

Год	pH	Σ кат.,	АК,	SO ₄ *,	Cl,	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
2009	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

Содержание техногенных сульфатов в воде озер I района резко снизилось уже к 1995 году (почти в 3 раза), поскольку питание озер определяется преимущественно атмосферными осадками. В ответ на снижение сульфатов произошло восстановление буферных свойств в воде озер за счет высокого содержания катионов. В озерах значительное снижение концентрации сульфатов от 127 до 35 мкЭв/л обусловило увеличение ANC от -9 до 69 мкмольЭкв/л.

В воде озер II района вследствие снижения содержания техногенных сульфатов происходит почти двукратное увеличение кислотнейтрализующей способности. В тоже время в озерах наблюдается уменьшение основных катионов и щелочности, что скорее всего связано с низкой способностью пород к восстановлению буферных свойств. В то же время в озерах произошло снижение рН (от 6.67 до 6.12).

Вследствие высокой буферной способности горных пород в озерах, расположенных в III районе отмечено увеличение содержания основных катионов (от 435 до 473 мкмольЭкв/л) и ANC (от 334 до 402 мкмольЭкв/л). Изменение остальных показателей химического состава вод было в пределах вариабельности.

В целом в воде озер IV района наблюдается восстановление буферных свойств, которое проявилось в увеличении щелочности и

кислотонейтрализующей способности в 2 раза, рН увеличился от 6.13 до 6.39. Также в районе существуют чувствительные озера, подстилающие породы которых представлены кварцитами и песчаниками.

В воде озер V района содержание сульфатов высокое по сравнению с другими районами и снижение их с 1990 г. по 2005 г. происходит только на 20 мкмольэкв/л при более чем трехкратном снижении выбросов Кольскими комбинатами диоксида серы в атмосферу (рис.3.8). Очевидно, что накопленные на водосборе сульфаты за предшествующий сокращению более чем 50-летний период интенсивного функционирования горно-промышленных комплексов продолжают мигрировать в озера, поддерживая их высокие концентрации в воде. Наряду со снижением потока сульфатов к 2009 г. увеличилось содержание катионов на 57 мкмольэкв/л, ANC снизился на 30 мкмольэкв/л.

Воды озер, расположенные в зоне влияния комбината «Печенганикель» (VI) характеризуются схожими особенностями с V районом. На фоне снижения содержания техногенных сульфатов в воде увеличилось содержание катионов на 51 мкмольэкв/л, ANC в тоже время снизился на 42 мкмольэкв/л, рН с 6.75 до 6.49.

В воде озер VII района при сокращении содержания техногенных сульфатов закономерно увеличилась щёлочность на 34 мкмольэкв/л и ANC на 84 мкмольэкв/л, содержания катионов практически не изменились.

3.9 Динамика металлов в воде озер исследуемых районов

Анализ пространственной и временной изменчивости особенностей формирования химического состава вод позволил выявить основные тенденции изменения содержания элементов в озерах вследствие атмосферных выбросов горно-металлургических предприятий (табл. 9). Эмиссия никеля и меди от Кольских комбинатов в целом снижалась с 1990-х годов (рис. 7), что непосредственно сказалось на распределении металлов в водных системах. Однако к 2005 году в водах преимущественно отмечено нарастание концентраций металлов вследствие пиковых выбросов диоксида серы и металлов.

Наиболее высокие концентрации Ni и Cu существуют в озерах, расположенных в зоне непосредственного влияния комбинатов (V и VI районы), что закономерно. В этих районах наблюдается значимое увеличение их концентраций до 2005 года, а затем тенденция к снижению. В остальных районах содержания этих элементов близки к региональным значениям (Moiseenko, 1999).

Более отчетливо прослеживается тенденция изменения таких элементов, как Fe и Al. В озерах, которые продолжают закисляться, расположенных на гранито-гнейсовых породах (районы I, II, III и VII), концентрации Al и Fe возрастают из года в год. Кислотное выщелачивание здесь является определяющим механизмом повышения концентраций этих элементов. Процессы оглеения также способствуют более активной водной миграции Fe и Al.

Максимальные концентрации Mn, Co отмечены в озерах, приуроченных к лесным и заболоченным массивам (II район). Повышенные по сравнению с другими районами концентрации Zn, Cr в озерах, расположенных в зоне влияния комбината «Североникель» (V район) обусловлены дымовыми выбросами. Увеличение содержания Pb и Cd в водах VII района связано с близостью расположения комбината «Печенганикель». В озерах, приуроченных к функционированию горнорудного предприятия «Апатит» (VI район) отмечены повышенные содержания Sr, что закономерно, т.к. он является одним из главных компонентов при добыче руды. Стронций в водах находится преимущественно в ионной форме, что свидетельствует о его распространении на большие расстояния.

Содержания Pb, Cr, Cd начали измерять в воде Кольских озер с 2000 года. Концентрации Pb были в пределах 0.10-1.09 мкг/л, Cr 0.07-0.59 мкг/л, Cd – 0.11-11.04 мкг/л. Максимальные концентрации Pb отмечены в озерах, расположенных в VII районе. Увеличение содержания Cr произошло в озерах, приуроченных к V району, Cd в озерах III района.

Таблица 9. Динамика металлов за 15-летний период (1995-2009) в различных районах Кольского Севера (в числителе представлены медианные значения, в знаменателе – пределы варьирования)

Год	Al	Fe	Cu	Ni	Co	Zn	Mn	Sr	Pb	Cr	Cd
	I, n=10										
1995	54	89	0.40	0.20	-	0.50	0.90	10.0	-	-	-
	16-94	18-320	0.3-0.7	0.10-0.30		0.20-1.50	0.20-5.30	8.00-14.0			
2000	38	24	0.40	0.20	0.30	0.60	0.40	8.10	-	0.15	0.11
	20-133	17.4-310	0.3-0.5	0.10-0.30	0.20-0.40	0.20-1.00	0.20-1.70	5.70-8.90		0.08-0.28	0.06-0.17
2005	31	47	0.94	1.06	0.47	1.66	2.09	7.56	0.47	0.50	0.36
	28.9-70.9	27.6-273	0.27-0.79	0.40-2.50	0.10-0.30	1.10-3.40	0.60-3.80	4.7-11.4	0.10-0.50	0.20-0.50	0.04-1.44
2009	74	98	0.70	0.80	0.20	1.80	1.30	13.0	0.40	-	-
	38-118	25-303	0.50-1.00	0.40-1.00	0.10-0.30	0.80-2.20	0.30-11.0	10.0-16.0	0.30-0.50		
II, n=15											
1995	18.0	26.0	0.65	0.40	-	0.60	2.50	19.0	-	-	-
	5-80	4-85	0.40-1.10	0.10-1.30		0.20-2.40	0.50-8.50	2.00-52.0			
2000	64.0	62	0.70	0.65	-	0.90	2.30	20.0	0.23	0.08	-
	9.4-81	20-180	0.30-1.40	0.30-1.00		0.20-2.20	0.90-7.30	4.00-39.0	0.09-0.45	0.07-0.09	
2005	86.0	118	1.00	2.33	3.10	2.45	6.77	9.33	0.89	0.51	0.46
	10-202	4.8-127	0.26-1.49	0.30-1.00	0.20-0.40	1.40-5.60	1.30-9.90	3.50-33.9	0.10-0.50	0.10-0.70	0.02-0.51
2009	85.0	77	1.40	0.70	0.30	1.30	3.50	22.0	0.80	0.35	0.07
	11-354	11-610	0.60-2.70	0.30-1.40	0.20-0.40	0.40-2.60	1.60-30.0	3.00-68.0	0.50-1.20	0.20-0.40	0.06-0.11
III, n = 23											
1995	36.0	39.0	0.50	0.70	-	1.10	2.30	17.0	-	-	-
	6.00-215	15.0-650	0.10-1.80	0.10-2.10		0.30-3.10	0.70-36.0	9.00-86.0			
2000	40.0	43.0	0.70	0.50	-	0.60	1.50	15.4	1	0.21	0.09
	3.50-1010	12.9-470	0.20-1.80	0.20-3.00		0.20-1.70	0.30-20.0	7.50-795	0.60-1.90	0.08-0.47	0.06-0.20
2005	50.0	102	1.22	2.63	2.66	2.06	5.26	20.4	0.96	0.38	0.98

2009	10.4-808	24.1-472	0.19-2.69	0.30-4.40	0.10-0.60	1.10-3.70	1.40-25.1	7.9--860	0.10-0.90	0.20-0.90	0.02-1.29
	73.0	123	0.80	0.65	0.20	1.55	4.80	27.0	0.30	0.30	0.10
	5.50-416	16-485	0.40-1.90	0.20-2.00	0.10-1.80	0.40-3.30	0.60-20.0	8.80-1400	0.20-0.50	0.20-0.70	0.07-0.13
IV, n=12											
1995	59.0	3.70	0.60	1.10	-	1.60	0.20	58.0	-	-	-
	43.0-209	0.80-65.0	0.10-2.70	0.30-1.80		0.50-4.20	0.10-3.50	27.0-60.0			
2000	18.7	10.5	0.30	0.60	-	0.95	0.70	71.5	-	0.17	0.07
	18.4-19.0	8.1-15.0	0.10-3.40	0.30-3.50		0.40-1.25	0.40-1.30	12.2-103		0.07-0.26	0.03-0.13
2005	41.0	36.0	1.40	1.19	0.58	1.72	4.22	23.5	0.42	0.46	0.42
	24.0-39.9	4.10-41.3	0.80-4.24	0.50-3.50	0.10-0.30	1.00-3.00	0.30-6.60	9.10-56.0	0.10-0.30	0.10-0.30	0.02-1.68
2009	66.0	13.8	0.60	0.45	0.20	1.15	1.65	75.0	-	0.30	0.07
	32.0-616	4.1-85.0	0.20-4.40	0.20-5.40	0.10-0.30	0.50-3.00	0.40-6.70	16.0-88.0		0.20-0.40	0.05-0.09
V, n=7											
1995	32.0	20.0	0.80	0.70	-	0.80	1.70	41.0	-	-	-
	20.0-87.0	7.00-97.0	0.50-1.80	0.10-1.10		0.30-3.90	1.30-8.50	25.0-160			
2000	33.0	21.0	0.55	0.60	-	0.80	1.40	38.0	-	0.16	0.08
	19.0-117	8.10-160	0.30-1.00	0.20-0.80		0.40-1.60	0.80-18.4	16.5-100		0.07-0.40	0.06-0.13
2005	66.0	84.0	4.23	7.22	0.67	2.94	4.22	17.5	0.41	0.59	0.15
	25.1-486	14.0-181	0.75-1.47	0.70-1.10	0.20-0.40	1.00-7.30	1.70-7.60	10.7-216	0.10-0.60	0.20-0.60	0.02-0.99
2009	29.5	29.0	1.00	0.55	0.25	0.90	2.25	50.0	0.35	0.20	0.07
	24.0-253	12.0-110	0.30-2.00	0.10-0.67	0.20-0.30	0.60-4.10	1.10-17.0	27.0-486	0.30-0.40	0.10-0.30	0.05-0.09
VI, n=23											
1995	32.0	92.0	1.80	5.45	0.40	1.10	4.00	20.0	-	-	-
	6.00-108	16.0-800	0.50-5.60	1.00-450	0.20-0.60	0.06-4.69	0.7-31.0	13.0-72.0			
2000	39.5	67.0	1.30	3.75	0.40	0.80	3.20	18.0	0.60	0.18	0.09
	17.0-145	12.0-340	0.60-7.90	1.00-300	0.30-1.20	0.30-2.50	0.80-14.0	6.40-65.0	0.40-0.80	0.10-0.61	0.06-0.20
2005	66.0	99.0	3.16	4.42	1.26	1.99	4.63	12.0	0.65	0.45	0.60
	10.1-178	13.7-421	0.69-46.0	0.30-528	0.20-4.70	0.90-8.50	1.20-44.4	5.30-64.8	0.10-2.00	0.10-0.70	0.01-1.38
2009	31.0	84.0	2.90	7.00	0.30	2.30	3.60	23.0	0.30	0.30	0.07
	7.0-80.0	13.0-242	0.90-14.0	1.10-760	0.20-1.10	0.50-4.90	0.90-25.0	14.0-87.0	0.20-0.50	0.20-0.70	0.05-1.37
VII, n=7											

1995	31.0	84.0	2.90	7.00	0.30	2.30	3.60	23.0	-	-	-
	7.00-80.0	13.0-242	1.00-14.0	1.00-760	0.20-1.10	0.50-4.90	0.90-25.0	14.0-87.0			
2000	37.8	106	0.60	1.00	0.30	1.50	2.20	15.1	0.30	0.20	0.09
	16.2-62.3	16.0-230	0.24-0.70	0.20-1.20	0.10-0.50	0.80-3.00	1.10-4.00	4.10-19.0	0.20-1.10	0.10-0.30	0.03-0.47
2005	32.0	87.0	1.48	2.58	0.61	2.21	3.35	13.4	1.09	0.30	1.04
	19.0-117	8.10-160	0.30-1.00	0.20-0.80	0.30-1.20	0.40-1.60	0.80-18.4	16.5-100	0.40-1.56	0.07-0.40	0.06-0.13
2009	56.5	124	0.85	0.75	0.20	2.20	3.60	30.0	0.40	0.30	0.42
	10.0-67.0	13.0-242	0.30-1.50	0.40-1.20	0.10-0.30	1.10-4.20	1.40-4.30	6.7-36.0	0.30-0.50	0.20-0.40	0.06-0.78

3.10 Содержание биогенных элементов и органического вещества в воде озер

В целом для природных вод Кольского региона характерно низкое содержание биогенных веществ и минеральных солей вследствие низких температур, уровней массообмена в высоких широтах, преимущественного атмосферного питания и тонкого почвенного слоя. Азотистые соединения, особенно минеральные формы, более растворимы, чем фосфорные, в связи с чем они легко вымываются из почв бассейна и поступают в водные объекты. Крайне низкие содержания минеральных форм азота и фосфора (NO_3 и PO_4) во всех районах объясняются их быстрой утилизацией в продукционных процессах (табл. 10).

Содержания общего азота в целом для всей совокупности озер тесно связаны с содержанием органического вещества ($\text{TN}=30.7*\text{POB}-1.5$, $r=0.63$, $n=97$). Также были выявлены зависимости для отдельных районов: для I района ($\text{TN}=23.6*\text{Сорг.}+60.9$, $r=0.73$, $n=10$), для IV района ($\text{TN}=30.6*\text{POB}+63.0$, $r=0.66$, $n=12$), для V района ($\text{TN}=24.2*\text{POB}+2.3$, $r=0.80$, $n=7$), для VII района ($\text{TN}=16.7*\text{POB}+65.4$, $r=0.91$, $n=7$). Для условно фоновых (I, II) и району, подверженному аэротехногенному загрязнению (VI) зависимости оказались недостоверными, что скорее всего связано с большой вариабельностью показателей в пределах рассматриваемой зоны.

В целом для озер I фонового района характерна низкая цветность, причем к 2009 г. произошло обесцвечивание вод до 7^0 Pt-Co. Озера этого субрегиона характеризуются высоким промывным режимом. К 2009 г. отмечено повышение содержания общего азота, фосфора, минерального фосфора, а также растворенного органического вещества, которое скорее всего обусловлено распространением торфянистых почв.

В озерах, расположенных во II районе произошло снижение цветности (от 103 до 70^0 Pt-Co). В воде озер отмечено снижение минеральных форм азота: аммонийного с (83 до 37 мкгN/л), нитратов (от 7.8 до 3.2 мкгN/л). Наличие торфяно-глеевых и торфяно-болотных со сфагновым и травяным торфом почв

обуславливают обогащение вод гумусовыми веществами. В этих условиях озера характеризуются развитием природного подкисления вод, которое выражается в следующем: активно произошло нарастание общего азота (почти в 2 раза), фосфатов и содержаний РОВ, причем в этой зоне оно самое высокое.

В озерах III района в силу максимальной залесенности территории наблюдалось увеличение содержаний биогенных элементов: аммонийного азота в 3 раза (от 17 до 56 мкгN/л), общего азота (от 212 до 319 мкгN/л), общего фосфора (от 6 до 14 мкгP/л). Содержание органического вещества напротив снизилось на 3.2 мгC/л.

В озерах, относящихся к IV району к 2009 гг. произошло увеличение содержания азотных соединений: общего азота (от 143 до 194 мкгN/л) и фосфора (от 3 до 7 мкгN/л), нитратов (от 0.8 до 3.8 мкгN/л). Содержание аммонийного азота сократилось почти в 3 раза. В тоже время произошло снижение цветности на 27° Pt-Co и в 2 раза органического вещества.

Озера, расположенные в зоне влияния комбината «Североникель» (V район), испытывают максимальную техногенную нагрузку на водные объекты, в отличие от других озер, что непосредственно сказалось на содержании биогенных элементов воде озер. В целом в воде озер к 2009 г. произошло нарастание общего и аммонийного азота, органического вещества, содержание нитратов сократилось в 5 раз. Концентрации остальных биогенных веществ были в пределах варьирования.

Озера, расположенные в зоне влияния аэротехногенного загрязнения со стороны комбината «Печенганикель» (VI район) также испытывают техногенную нагрузку на водные объекты, что непосредственно сказалось на содержании биогенных элементов в воде озер. В целом тенденции схожи с теми, которые характерны для озер, расположенных в V районе, за исключением снижения цветности в 2 раза. Содержание органического вещества и биогенных элементов постепенно увеличивалось за рассматриваемый период.

В озерах, расположенных на удалении от комбината «Печенганикель» (VII район) увеличение содержания общего азота и фосфора, за счет его минеральных

форм, нитраты и аммоний содержатся в минимальных количествах, не влияющих на баланс ионов. Высокое содержание органического вещества, скорее всего, обусловлено наличием заболоченных территорий, однако в то же время наблюдается тенденция к обесцвечиванию вод.

Таблица 10. Медианные значения биогенных элементов за 20-летний период (1990-2009) в различных районах Кольского Севера

Год	TN, мкгN/л	NH ₄ , мкгN/л	NO ₃ , (мкгN/л)	TP, мкг/л	PO ₄ , мкгP/л	Цветность, о Pt-Co	ПО, мг/л	РОВ, мг/л
I, n=10								
1990	174	21	2.1	0	1.9	42	5.1	3.1
1995	148	13	1.4	6	0.4	21	4.2	3.8
2000	161	27	1.6	5	0.8	14	6.6	4.2
2005	246	35	3.3	6	2.6	15	6.3	5.2
2009	244	12	1.8	11	4.3	7	7.4	4.1
II, n=15								
1990	156	83	7.8	39	1.2	103	6.3	10.4
1995	136	71	6.8	30	1.4	92	6.3	11.3
2000	270	52	5.2	12	2.5	83	9.5	12.2
2005	239	39	4.3	15	3.4	81	10.0	14.7
2009	342	37	3.2	15	4.6	70	8.5	14.6
III, n=23								
1990	212	17	5.7	6	0.9	64	5.5	8.5
1995	203	12	8.9	7	0.1	54	5.4	8.2
2000	228	63	5.7	5	3.1	46	6.2	7.0
2005	261	49	4.2	11	3.7	35	5.6	6.3
2009	319	56	2.9	14	1.9	34	5.9	5.2
IV, n=12								
1990	143	72	0.8	7	1.5	42	7.0	6.2
1995	148	45	1.2	5	0.2	25	5.8	5.1
2000	161	43	1.3	5	0.8	23	7.4	4.2
2005	186	42	2.0	7	1.8	22	7.3	3.8
2009	194	25	3.8	14	7.4	15	8.5	3.1
V, n=7								
1990	189	11	6.5	16	3.3	43	10.2	4.6
1995	203	16	6.3	17	0.3	39	7.4	5.1
2000	204	24	3.3	19	2.3	38	11.5	5.8
2005	212	26	5.2	21	2.3	32	11.1	6.2
2009	214	27	1.3	23	1.7	25	8.6	6.5
VI, n=23								
1990	190	17	6.1	13	3.1	32	8.5	5.9
1995	195	14	4.2	14	1.3	29	9.1	6.4
2000	204	19	2.6	16	1.1	18	9.1	6.9
2005	213	25	1.1	17	0.8	15	7.9	7.1

2009	218	24	1.7	19	0.5	15	7.7	7.2
VII, n=7								
1990	177	9	4.7	9	2.8	40	6.8	6.1
1995	184	11	3.4	11	2.5	37	5.7	6.2
2000	183	12	2.5	12	1.9	31	5.9	6.5
2005	213	14	2.4	14	1.8	26	6.0	6.6
2009	220	15	1.8	15	1.5	24	7.3	6.8

3.11. Долговременные тенденции изменения химического состава вод в ответ на снижение аэротехногенной нагрузки

Для оценки изменчивости химического состава вод были проанализированы данные по основным показателям для 75 озер, которые повторялись раз в 5 лет (1990, 1995, 2000, 2005, 2009) (рис. 11).

В воде озер на фоне снижения содержания техногенных сульфатов (максимальные значения от 155 до 127 мкмоль-экв/л, в среднем на 86 мкмоль-экв/л) наметились позитивные тенденции, которые проявились в следующем: в воде озер произошло резкое увеличение максимальных содержаний суммы катионов (на 470 мкмольэкв/л) и незначительное медианных значений (на 25 мкмольэкв/л). Максимальные значения щелочности увеличились почти в 2 раза, в среднем на 41 мкмоль-экв/л, рН незначительно снизился (в среднем от 6.79 до 6.58). Более наглядно эти процессы протекают в озерах, попадающих в область 50 % значений. Содержание техногенных сульфатов с 1990 к 2009 г. снизилось в 3 раза (с 17 до 6 мкмоль-экв/л). Щелочность напротив, увеличилась в 3 раза (с 64 до 184 мкмоль-экв/л). Распределение рН носит неоднородный характер, однако можно отметить тенденции к снижению значений и увеличению количества озер с такими показателями. Нарастание содержания катионов сопровождалось двукратным увеличением количества озер с высокой буферной емкостью.

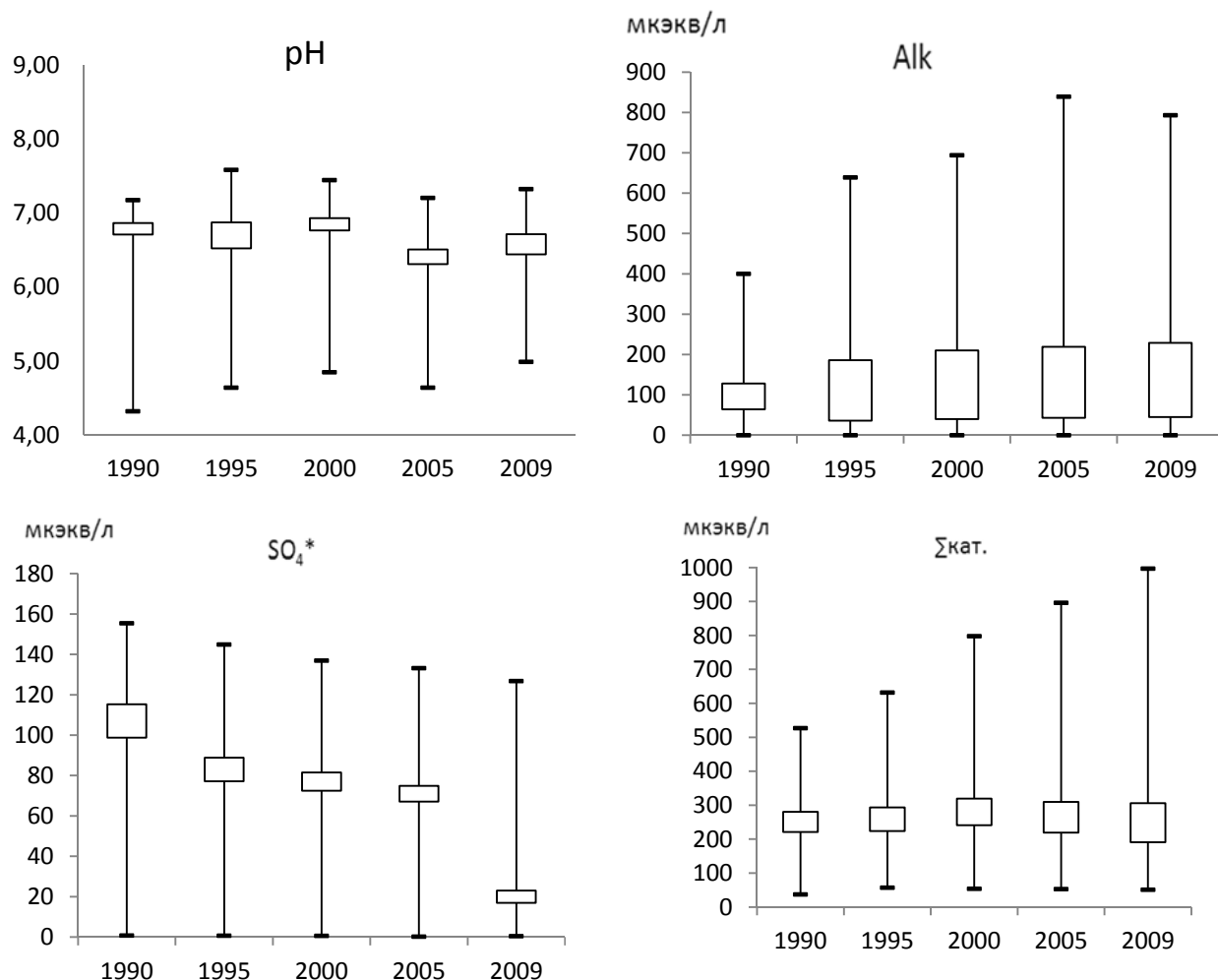


Рис. 11. Распределение pH, суммы катионов, техногенных сульфатов и щелочности в воде малых озер Кольского Севера ($p=0.05$, $n=75$), ■ границы минимума и максимума, □ значение 50 %-ых случаев

Определяющую роль в процессах закисления или восстановления вод озер Кольского региона играет удаленность от источника загрязнения, геологическая структура подстилающих пород и ландшафтные особенности. Каждое озеро обладает своими уникальными характеристиками, которые определяют изменение химического состава вод при снижении потока техногенных сульфатов на водосборы. Было выделено 3 зоны относительно комбинатов «Североникель» и «Печенганикель»: 1 - <30 км – локальная зона, к которой приурочены озера, подвергшиеся воздействию пылевой эмиссии со стороны комбинатов; 2 - 30-100 км – буферная зона, где влияние азротехногенного источника сводится к минимуму и с целью исключения влияния техногенного фактора была выделена 3 - зона > 100 км.

В локальной зоне влияния комбинатов (расстояние до 30 км) формирование химического состава вод определяется влиянием пылевой эмиссии, при растворении которой в воду добавляются основные катионы, которые подщелачивают воды. К тому же подстилающие породы в этой зоне способствуют нейтрализации кислотных осадков, поэтому эти озера имеют высокую буферную способность. Основные породы (базальты, габбро и др.), а также щелочные массивы Хибинских гор (нефелиновые сиениты) определяют буферные свойства озер в зоне на удалении 30-100 км от комбинатов. Поэтому, при некоторой вариабельности содержаний катионов, в воде возрастает щелочность в ответ на снижение выпадения сульфатов на водосборы. В то же время на возвышенностях, представленных обнажениями гнейсовых пород, существуют закисленные озера.

В зонах на удалении более 100 км направленность процессов неоднозначна. В прибрежных тундровых озерах, приуроченных к обнажениям гранитных пород, для большей части озер отчетливо обозначилось восстановление щелочности, рН и ANC. Однако в некоторых лесных озерах, подстилающие породы которых представлены песчанистыми кварцами, происходит снижение концентраций

Распределение показателей химического состава вод малых озер Кольского Севера в период снижения антропогенных нагрузок аналогично с ситуацией, наблюдающейся в Скандинавских странах и Северной Америке (табл. 11).

Таблица 11. Результаты анализа тренда показателей химического состава различных групп (категорий) вод малых озер за 20 – летний период (1990-2009 гг.)

Категория	n	SO ₄ [*]	Cl	Alk	ANC	pH	∑кат.	POB
	кол-во озер	мкмольэкв/л	мкмольэкв/л	мкмольэкв/л	мкмольэкв/л		мкмольэкв/л	мгС/л
<30 км от комбинатов								
Цветность <30 ⁰ ANC>50 мгэкв/л	7	-	(-) ^{***}	(-) ^{***}	(-) ^{**}	(-) ^{***}	(-) ^{***}	(+) ^{***}
30 - 100 км от комбинатов								
0<ANC<50 мгэкв/л	2	(-) ^{***}	(-) ^{***}	(+) ^{**}	(+) ^{***}	(+) ^{***}	(-) ^{**}	(-) ^{***}
ANC>50 мгэкв/л	27	(-) ^{**}	(-) ^{**}	(-) ^{**}	(+) ^{***}	(-) ^{**}	(-) ^{***}	(+) ^{**}
Цветность <30 ⁰	5	(-) ^{***}	(-) ^{**}	(-) ^{**}	(+) ^{***}	(+) ^{**}	(-) ^{***}	(-) ^{**}
Цветность 30-100 ⁰	10	(-) ^{**}	(-) ^{***}	(+) ^{**}	(+) ^{***}	(-) ^{**}	(-) ^{***}	(+) ^{***}
более 100 км от комбинатов								
0<ANC<50 мгэкв/л	3	(-) ^{***}	-	(+) ^{***}	-	(+) ^{***}	(-) ^{***}	-
ANC>50 мгэкв/л	34	(+) ^{***}	-	(-) ^{***}	(+) ^{**}	(-) ^{**}	(+) ^{***}	(+) ^{***}
Цветность <30 ⁰	7	(+) ^{**}	(-) ^{***}	(-) ^{***}	(-) ^{***}	(-) ^{**}	(+) ^{**}	(+) ^{***}
Цветность 30-100 ⁰	5	-	(-) ^{***}	(-) ^{***}	(+) ^{***}	(-) ^{**}	(+) ^{***}	(+) ^{**}

** p<0.01, *** p<0.001, - недостоверная значимость

Были выделены группы по степени закисления: озера с низкой буферной емкостью ($0 < ANC < 50$) и озера со средней буферной емкостью ($ANC > 50$).

В локальной зоне (менее 30 км от комбинатов) вокруг комбинатов рассмотрены озера со средней буферной емкостью. За период исследования существенных изменений буферных свойств воды (ANC и $\sum_{кат.}$) не наблюдалось, цветность в рассматриваемых озерах была меньше 30^0 . Поскольку, в зоне влияния комбинатов водосборы малых озер преимущественно сложены основными породами – базальтами и габбро, обогащение вод катионами происходит быстрее. В силу ландшафтных особенностей территории, вокруг Североникеля и Печенганикеля процессы протекают по-разному. В районе Североникеля поступление техногенных сульфатов оказывает нейтральное воздействие на изменение химического состава вод, поэтому сложно выделить доминирование тех или иных тенденций. В зоне влияния комбината Печенганикель в силу влияния морских аэрозолей намечаются тенденции к закислению озер.

В буферной зоне (30-100 км от комбинатов) представлены озера с низкой и со средней буферной емкостью. В озерах с низкой буферной емкостью наблюдаются процессы восстановления. В результате снижения поступления сульфатов отмечается увеличение кислотнейтрализующей способности вод. В озерах с низкой буферной емкостью наблюдается увеличение рН и закономерное снижение концентрации слабых органических кислот. В озерах со средней буферной емкостью напротив, идут процессы закисления вод, причем в более цветных озерах эти механизмы выражены ярче – снижение рН и как следствие увеличение растворенного органического углерода, а также снижение суммы катионов. В закисленных озерах снижение ANC и как следствие рН свидетельствуют о развитии процессов закисления в озерах.

В фоновой зоне (более 100 км от комбинатов) реакция озер на сокращение эмиссии выпадения сульфатов неоднозначна. В озерах с низкой буферной емкостью достоверность некоторых гидрохимических показателей в рассматриваемый период была низкой (Cl, ANC, POB). Однако наблюдается тенденция обеднения вод катионами, что в первую очередь обусловлено ландшафтными особенностями территории. Наиболее уязвимые озера тундровой зоны, сложенные низкощелочными породами, подвержены процессам закисления. В озерах со средней буферной емкостью развиваются механизмы закисления. На фоне увеличения концентрации сульфатов происходит снижение кислотнейтрализующей способности вод, буферной емкости вод, снижение рН и как следствие увеличение слабых органических кислот. В более цветных водах наблюдается восстановление буферных свойств вод и увеличение кислотнейтрализующей способности вод.

Сокращение эмиссии сульфатов не приводит к сходным реакциям во всех озерах: в каких-то озерах намечается тенденция восстановления буферных свойств вод; в каких-то озерах гидрохимические показатели за долговременный период наблюдений остаются неизменными; а в каких-то озерах продолжают развиваться процессы закисления. Изменение в химическом составе воды малых озер Кольского Севера в первую очередь обусловлено ландшафтно-геологическими особенностями территории и последствиями влияния аэротехногенного воздействия на них.

На основе анализа данных исследований доказано улучшение химического состава вод в ответ на снижение выбросов загрязняющих веществ в воде Кольского региона, которые проявились в снижении содержания сульфатов и увеличении кислотнейтрализующей способности вод (ANC). Изменения остальных показателей химического состава вод озер зависят от геологических и ландшафтных условий формирования вод: щелочность и рН повысились в 46 % озер, в 24 % происходит дальнейшее снижение этих показателей, и в 31 % - достоверных изменений не

прослеживается. Высокие буферные свойства пород в западной части Кольского региона, а также пылевая эмиссия вокруг комбинатов маскирует восстановление озер. Однако восстановление качества вод на уязвимых водосборах происходит медленно. Несмотря на значительное сокращение выбросов кислотообразующих веществ, возвращение к прежнему экологическому состоянию водной экосистемы не происходит. Это особенно выражается в обеднении вод обменными основаниями, несмотря на снижение содержания сульфатов и нитратов в водных объектах. Большую роль играет тенденция к увеличению слабых органических кислот (растворенного органического углерода), на фоне снижения потока сильных кислот. Определяющую роль в механизмах закисления или восстановления вод играет удаленность от источника загрязнения. В локальной зоне влияния комбинатов формирование химического состава вод обусловлено последствиями пылевой эмиссии и высокой концентрацией техногенных сульфатов в водах озер. В буферной и фоновой зонах направленность процессов неоднозначна. В озерах с низкой буферной емкостью наметилась тенденция восстановления буферных свойств вод. В озерах со средней буферной емкостью наблюдаются процессы закисления, причем в цветных водах эти тенденции выражены ярче. В силу того, что малые озера в большей степени подвержены аэротехногенному воздействию, степень реакции будет определяться ландшафтными особенностями их водосборов. Так, малые озера тундровой зоны наиболее уязвимы к аэротехногенному закислению.

3.12 Изменение содержания органического вещества, биогенных элементов.

В водных системах Европы и Северной Америки в последние десятилетия прослеживается тенденция увеличения растворенного органического вещества (РОВ) (Monteith et al., 2007; Evans et al., 2008; Clark, 2010). Существует 2 гипотезы увеличения содержания РОВ. Ряд ученых (Monteith et al., 2007) объясняют повышение содержания РОВ снижением

потока сильных кислот и возвратом химического состава вод к природным значениям этого показателя. В работе (Evans et al., 2008) доказано, что в Великобритании при уменьшении поступления в озера сильных неорганических кислот пропорционально (на 15-50%) от их снижения увеличивается содержание органических кислот. В удаленных регионах Великобритании (Шотландии и северной Ирландии) эта пропорция может быть выше и объяснена другими факторами, например, влиянием потепления климата.

На Кольском Севере повышение РОВ отмечается как в целом для совокупности озер, так и для большинства районов за исключением высокочувствительных озер в I и II районах (гранитных и кварцевых формаций). Здесь содержания РОВ или мало варьируют, или снижаются, что закономерно при прогрессирующем закислении вод. Clark et al. (2013) показали, что природные гумусовые вещества способны продуцировать сильные органические кислоты и увеличивают кислотность вод.

Известным является факт, что РОВ имеет прямую зависимость с цветностью вод поскольку гумусовые кислоты окрашивают воду в коричневый цвет. Для Кольского Севера по данным 1995-2009 гг. зависимость между изменением цветности и РОВ аппроксимировалась следующим уравнением:

$$\Delta\text{РОВ} = 5.49 \cdot \Delta\text{Цветность} - 2.62 \quad (r = 0.81, n = 75)$$

Этот феномен можно объяснить следующими двумя химическими процессами, протекающими в воде.

1. Цветность вод определяется преимущественно крупными молекулами гуминовых кислот, молекулярная масса которых исчисляется десятками тысяч Да. Высокомолекулярные органические вещества гумусовой природы могут диссоциировать в воде с образованием свободного протона, а также вступать в реакции разложения (гидролиза) и

диспропорционирования с образованием низкомолекулярных фрагментов, которые, в свою очередь, также способны к отщеплению протона (см. схему ниже). Указанные процессы могут катализироваться неорганическими сильными кислотами, поступающими из антропогенных и природных источников. Ниже представлена схема реакции разложения органических веществ гумусовой природы, где R_i – несимметричные фрагменты природного полимера, X_iH – функциональные группы органических веществ гумусовой природы, n — количество протонов (Моисеенко, Дину, 2015).

Этим феноменом может объясняться прогрессирующее закисление вод и снижение цветности при снижении потока сильных кислот на водосборы.

2. Потепление климата стимулирует эвтрофирование вод. Обычно, это приводит к увеличению цветности за счет выщелачивания гумусовых веществ. Однако при поступлении в водную среду сильных кислот происходит разложение гумусовых веществ на фракции. Можно предположить, что в природных водах меняется структура органического вещества - снижается доля высокомолекулярных гуминовых кислот. Вследствие взаимодействия гумусовых веществ с протонами гуминовые кислоты осаждаются в донные отложения, фульвокислоты остаются в воде. Фульвокислоты характеризуются более низкой молекулярной массой (от 500 до 2000 Da) и слабо влияют на цветность вод.

Таким образом, возможно, наряду с повышением содержания органического вещества меняется его состав в сторону повышения доли низкомолекулярных соединений. Снижение цветности может быть объяснено двумя механизмами. С одной стороны под действием сильных кислот происходит разложение гумусовых веществ, которые усиливают кислотные свойства вод, приводя к снижению цветности. Этот феномен хорошо доказан в работе Evans et al. (2011) и Clark et al. (2013). С другой стороны – в условиях эвтрофирования может снижаться доля гуминовых кислот, как основного компонента, обуславливающего цветность вод.

Отмечен факт, что к 2009 году цветность достоверно снизилась на 30^0 Pt-Co, а содержание РОВ в воде озер с 1990 по 2010 г. достоверно увеличились (в среднем от 4.9 до 7.4 мгС/л) (рис. 12). Обогащение вод биогенными элементами к 2009 году характерно и для урбанизированных регионов в пределах 30-ти км зоны вокруг комбинатов и также ясно прослеживается в отдаленных тундровых и особенно, заболоченных массивах. Наряду с увеличением РОВ за исследуемый период увеличились содержания общего фосфора (в среднем от 1 до 7 мкгР/л) и общего азота (в среднем от 170 до 223 мкгN/л). Количество закисленных озер резко снизилось к 2009 году. В тоже время содержание органического вещества постепенно нарастало к 2009 году, достигнув максимума. Содержание общего азота носит неоднородный характер в течение периода исследования. Крайне низкие содержания общего фосфора, характерные для половины исследуемых озер, скорее всего, связаны с активной утилизацией продукционных процессов. Максимальные содержания, отмеченные для небольшой группы озер обусловлены особенностями рудопроявлений, а также поступлением с водосборных территорий. В связи с потеплением климата, поступление и накопление биогенных элементов и органических веществ происходит быстрее. Увеличение миграции фосфора и азота с водосборных бассейнов может способствовать эвтрофикации озер (Feuchtmaur et al., 2009). Основываясь на регрессионной модели для озер (Moiseenko et al., 2013) на территории было показано, что увеличение средней суточной температуры на 0.5°C способствует увеличению общего фосфора на 25-30 % в озерных системах тундровой и таежных зон. Сопряженное нарастание по годам содержаний органического вещества и биогенных веществ подтверждается корреляцией между РОВ и TP ($r = 0.68$, $n = 97$), между РОВ и TN ($r = 0.61$, $n = 97$). Следует отметить, что озера исследовались в осенний период, когда органические формы биогенных элементов высвобождаются в воду и служат хорошим индикатором

эвтрофирования вод. Однако это не отрицает причин повышения содержаний органического вещества за счет снижения выпадений сильных кислот.

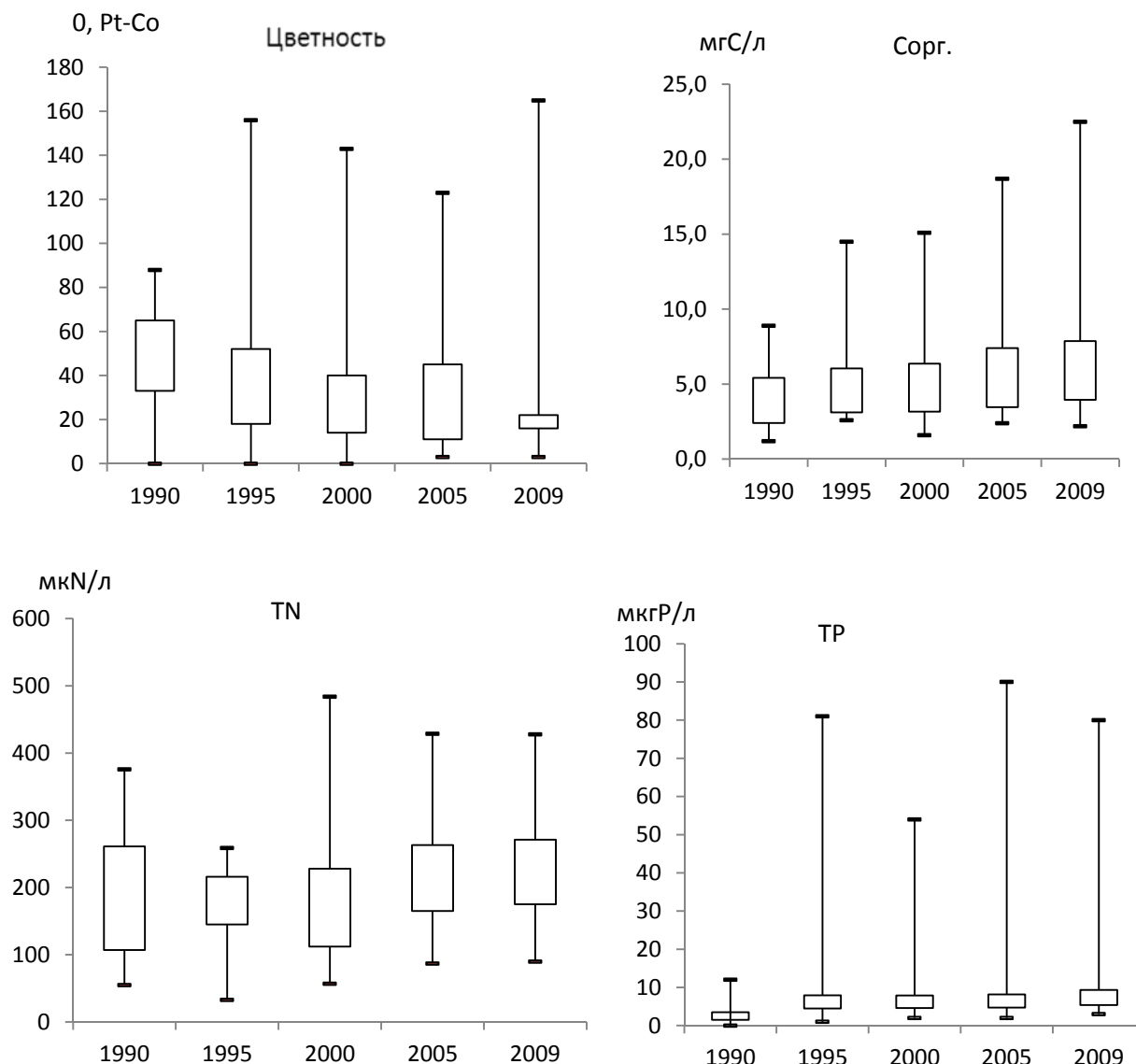


Рис. 12. Распределение содержания органического вещества и биогенных элементов в воде малых озер Кольского Севера ($p=0.05$, $n=97$), — границы минимума и максимума, \square значения 50-ых случаев

Поверхностные воды Кольского Севера характеризуются низкими содержаниями биогенных элементов вследствие низких температур, преимущественно атмосферного питания и тонкого почвенного слоя. Крайне низкие содержания минеральных форм азота и фосфора (NO_3 и PO_4) во всех субрегионах объясняются их быстрой утилизацией в продукционных процессах. Содержание аммонийного азота также незначительно, в 1990-х гг. менялось в диапазоне от 0 до 7 мкг/л, а нитратного азота от 0 до 8 мкг/л.

Содержание фосфатов в водах исследуемых озер варьировало от 1 до 6 мкг/л. Отчетливо прослеживается нарастание содержания общего азота (в среднем от 170 до 260 мкгN/л) и фосфора (в среднем от 1 до 11 мкгP/л) за счет органических форм из года в год. В связи с потеплением климата, поступление и накопление биогенных элементов и органических веществ происходит быстрее.

3.13 Трансформация органического вещества

В целом в воде озер произошло образование нового биохимически трудноокисляемого органического вещества (аллохтонного) и уменьшилась доля легкоокисляемых фракций (фульвокислот), что подтверждается следующими зависимостями.

1990 - Цв = 9.3 ПО – 6.9 ($r=0.92$, $n=97$)

1995 - Цв = 13.5 ПО – 31.4 ($r=0.97$, $n=97$)

2000 - Цв = 6.1 ПО – 7.3 ($r=0.96$, $n=97$)

2005 - Цв = 5.4 ПО - 6.4 ($r=0.93$, $n=97$)

2009 - Цв = 4.4 ПО – 4.2 ($r= 0.94$, $n=97$)

В озерах, находящихся в зоне влияния горнорудных предприятий непросто выделить преобладающие процессы трансформации органического вещества. Сложно провести грань между природой образования ОВ, ввиду того, что накладывается влияние трех факторов – продолжительность аэротехногенного загрязнения, поступление с промышленными и сточными водами, а также вымывание веществ из почв.

Озера, приуроченные к фоновым районам (I, II) характеризуются снижением в воде содержания органического вещества и образованием нового органического вещества, вероятнее всего трудноокисляемого, поступившего с водосбора.

В воде озер, изменение содержание органического вещества происходит по-разному (табл. 12). Среди 97 исследованных озер, в 17 идут разнонаправленные процессы: в 15 озерах при уменьшении цветности

происходит увеличение органического вещества, в 2 при повышении цветности содержание органического вещества снижается. Фактором снижения содержания ОВ в природных водах (причем аллохтонного происхождения), который сопровождается снижением цветности воды является процесс седиментации, то есть соосаждения. Эти процессы активно протекают в III, IV и VI районах, т.е. лесотундровой и северо-таежной зонах. В фоновых (I и II) и III, IV, VI районах встречаются озера, в которых происходят однонаправленные процессы снижения органического вещества и цветности. Сопряженное нарастание этих показателей больше всего в тундровом I, таежном III и лесотундровом VI районах, что вероятно обусловлено ландшафтными особенностями территории. Наличие торфянистых отложений и прибрежных болот в I районе способствуют поступлению гумусовых веществ в воду. В III и VI районе засчет высокой доли заболоченности и почв с высоким содержанием гумуса происходит увеличение гумусовых веществ, которые вымываются из лесной подстилки и попадают в воду с поверхностными и подземными водами.

Таблица 12. Тенденции изменения содержания цветности и органического вещества в воде озер выделенных районов

	I, n=10	II, n=15	III, n=23	IV, n=12	V, n=7	VI, n=30	всего
РОВ↑ Цветность↓	1	-	5	1	1	7	15
РОВ↓ Цветность↑	1	-	1	-	-	-	2
РОВ↑ Цветность↑	4	3	6	1	1	4	19
РОВ↓ Цветность↓	-	2	5	5	-	4	16
нет тенденций	4	10	6	7	5	10	47
всего	10	15	23	12	7	25	97

Выводы:

Изменение химического состава вод Кольского Севера происходит под воздействием природных и антропогенных процессов. Выпадения техногенных сульфатов привело к его повышенным концентрациям в водах региона и обусловило закисление вод в озерах, водосборы которых сложены гранитогнейсовыми формациями (12 %). Большая часть озер (77 %) сохраняет буферные свойства вод, причем их расположение приурочено к породам, способным к нейтрализации кислотных выпадений.

За 20-летний период снижения объемов выпадения кислот на водосборы наблюдаются тенденции к восстановлению буферных свойств системы. Доказано, что в отдельных озерах прогрессирует закисление вод. Несмотря на значительное уменьшение выбросов в атмосферу оксидов серы и металлов, восстановление химического состава вод (точнее, возврата к прежнему природному состоянию) не наблюдается.

Глава 4. Геохимические особенности распределения элементов в воде малых озер

4.1 Микроэлементный состав воды малых озер

Кольский Север подвержен многолетнему воздействию горнорудных и плавильных производств, поэтому сложно встретить водные объекты, которые могут служить в качестве фоновых озер. Наиболее удаленными являются районы I и II (см. рис. 8), воды озер которых характерны для северной части Фенноскандии. В 1995 году в рамках проекта «Survey lakes» было изучено распределение концентраций элементов в странах Балтийского кристаллического щита (Швеция, Норвегия, Финляндия). Пробы были отобраны в местах, удаленных от промышленных производств и практически не имеющих природных месторождений полезных ископаемых, поэтому концентрации элементов можно принять за условно-фоновые значения. Для сопоставления были использованы данные по 10 элементам (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V), приведенные в работах (Skjelkvåle et. al., 2001) по северным регионам Швеции, Норвегии и Финляндии. Также для анализа были использованы дополнительные данные по 26 элементам, включая вышеприведенные 10, в целом для Норвегии, которые представлены в работе (Reimann et. al., 1998). Элементы Al, As, Br, Se, Sc, Sn, Ga, Zr, Cs, W, La, Gd, Pr не были измерены в рамках этих исследований. Концентрации элементов, полученные в вышеприведенных исследованиях сопоставимы между собой, что подтверждает выделение северных районов Фенноскандии в качестве условно-фоновых (табл. 13). Следует отметить, что эти регионы обладают схожей геологической структурой и геохимическими свойствами пород. Возраст пород в основном охватывает период архея и раннего протерозоя, в крупных районах Кольского Севера и в Финляндии преобладают породы архейского возраста. В Финляндии породы в основном представлены кислыми гнейсами, кварцитами и железистыми амфиболитами, которые сходны с геологической структурой северо-восточной и восточной частей Кольского Севера. Северная часть Финляндии и Норвегия сложены кислыми

гнейсами и тоналитами. Территория Норвегии преимущественно сложена скалистыми породами протерозойского возраста, которые отдельной полосой простираются в северной части Кольского региона, на побережье Баренцева моря, а также песчаниками (Reimann et al., 1998).

Таблица 13. Элементный состав вод в озерах Фенноскандии (1) и в озерах Норвегии (2) в мкг/л

Элемент	*1 - med (min-max)	**2 - med (min-max)
Pb	0.14 (<0.03-7.69)	0.18 (<0.03-4.8)
Cd	<0.02 (<0.02-0.21)	<0.02 (<0.02-0.255)
Zn	1.1 (<0.3--)	1.7 (<0.3-139)
Cu	0.33 (<0.20-3.0)	0.41 (<0.2-37.7)
Ni	0.24 (<0.10-3.17)	0.33 (<0.1-4.82)
Co	0.05 (<0.02-0.96)	0.05 (<0.002-3.15)
Fe	53 (<15-1542)	60.7 (15-7680)
Mn	2.3 (<0.1-101)	3.43 (<0.2-327)
Cr	<0.1 (<0.1-2.05)	<0.1 (<0.1-4.85)
V	<0.3 (<0.3-2.23)	<0.3 (<0.3-2.43)
Sr	-	5.91 (0.32-3861)
Li	-	0.17 (<0.01-134)
Mo	-	<0.04 (<0.04-6.95)
U	-	0.041 (<0.004-2.22)
Rb	-	0.49 (0.052-71.1)
Sb	-	0.03 (<0.01-0.358)
Ba	-	3.08 (0.11 - 147)
Be	-	<0.01 (<0.01-1.34)
B	-	1.41 (0.2-2513)
Ti	-	4.86 (<0.4-1.22)
Y	-	0.09 (<0.003-2.7)
Ag	-	<0.01 (<0.01-0.436)
Bi	-	<0.02 (<0.02-3.62)
Ce	-	0.212 (0.007-4.52)
Sm	-	<0.03 (0.015-0.535)
Nd	-	0.15 (<0.01-2.5)

*1 - условно-фоновые элементы, определенные в рамках проекта «Survey lakes» в странах Балтийского кристаллического щита (Швеции, Финляндии и Норвегии) (Skjelkvåle et. al., 2001);

**2 – условно-фоновые элементы по водным объектам Норвегии, представленные в работе (Reimann et al., 1998)

- нет данных

В таблице 14 приведены данные по элементному составу вод озер Кольского региона в пределах обозначенных зон (средние геометрические и коэффициенты вариации).

Воды озер I района вследствие поступления морских аэрозолей характеризуются повышенным содержанием Вг. В воде озер значения концентраций Zn, Mn, Co, U, Sr, Y, Nd ниже по сравнению со средними по районам и сопоставимы с условно-фоновыми. В связи с минимальной техногенной нагрузкой и преобладанием пород кислого состава (гранитосодержащие породы) в воде озер этого района в основном отмечены такие же низкие концентрации большинства элементов по сравнению с условно-фоновыми концентрациями, которые можно принять для тундровой зоны Фенноскандии (табл. 12).

Воды озер II района характеризуются повышенными значениями гумусовых веществ и таких типоморфных элементов, как Al, Fe и Mn. Наряду с повышенным содержанием Al, Fe и Mn, по сравнению с тундровой зоной отмечается некоторое повышение содержаний Co, Zn, Sr, Li, Y и других элементов. Повышенное содержание Mo, Sc, Sn, Y, Zr, La, Ce, Sm, Gd, Pr, Nd по сравнению с I районом обусловлено влиянием лесных и заболоченных ландшафтов, более мощным почвенным слоем, а также близостью к Ловозерским и Хибинским тундрам, которые характеризуются наличием месторождений щелочных и щелочноземельных элементов.

В воде озер III района, несмотря на незначительную техногенную нагрузку, отмечено повышенное содержание элементов Co, Pb, Cr, Cd, Sb, Ag, W, Zr, La, Ce, Gd, Pr, Nd по сравнению с водами северной части Фенноскандии, что связано с большим разнообразием геохимического состава слагающих пород. Повышенное содержание Pb скорее всего связано с интенсивностью автомобильного транспорта, вследствие сжигания топлива. В воде озер отмечено также более высокое содержание Mn, Sr, Li, V по сравнению с условно-фоновыми значениями. Повышенное содержание Sr, Zr

и La, Ce, Gd, Pr, Nd в воде озер относительно средних по районам вероятнее всего связано с наличием щелочных пород.

Выщелачивание щелочных пород создает условия для нейтрализации выпадающих кислотных осадков (с pH ниже 5.0) и миграции в воду щелочных и щелочноземельных элементов. Увеличение в воде озер содержания U, Sn возможно связано с разработкой месторождений Ловозерских тундр и Оленегорского месторождения.

Воды Хибинских озер, характеризуются повышенными значениями Al, La, Sr, U, Be по сравнению со средними по обозначенным районам. Источником распространения этих элементов является пыление горнорудных предприятий. В силу особенностей геологической структуры (наличие щелочных гранитов и нефелиновых сиенитов), воды озер характеризуются повышенным содержанием характерных элементов, таких как: щелочные Rb (в среднем 2.04 мкг/л) и Cs (в среднем 3.75 мкг/л), щелочноземельные Sr (в среднем 23.51 мкг/л), Li (в среднем 1.67 мкг/л) и редкоземельные элементы La (в среднем 10.92 мкг/л), Ce (в среднем 4.90 мкг/л) и второстепенного Ba (в среднем 9.36 мкг/л).

Кислая среда, характерная для озер, расположенных в V районе независимо от природных или техногенных условий способствует увеличению содержания элементов Cu, Ni, Zn, Mn, Sr, Li, Ba, B, Ag. Содержание в водах Cu (в среднем 4.23 мкг/л), Ni (в среднем 7.22 мкг/л), Se (в среднем 1.36 мкг/л), Bi (в среднем 1.46 мкг/л), происходит в результате антропогенного рассеивания от промышленных предприятий. Концентрации Cu и Ni по сравнению с условно-фоновыми превышены в 10-12 раз. Следует отметить, что границы выделенных районов достаточно условны, поэтому произошло некоторое увеличение Cs, La, Ce, Pr в воде озер связано с близостью к горнорудным производствам и влиянием воздушного переноса хвостов обогащения.

Озера, приуроченные к комбинату «Печенганикель» (VI район), характеризуются повышенным содержанием Ba, Rb, Cs, Y, которые входят в

состав биотитовых, амфибол-пироксеновых гнейсов (Иванов, 1994). Повышенное содержание Cu (в среднем 3.16 мкг/л) и Ni (в среднем 4.42 мкг/л) обусловлено выбросами от предприятий, увеличение в водах Ti и V возможно также связано с рассеиванием элементов в процессе добычи руды.

Воды озер, расположенные в лесотундровой части региона (VII район), вследствие влияния дымовых выбросов характеризуются повышенными по сравнению со среднерегionalными содержаниями Pb, Cd, Ba, Br которые в условиях кислой среды активно выщелачиваются в воды.

Таблица 14. Средние геометрические (S) и коэффициенты вариации (v) содержаний микроэлементов (мкг/л) в воде озер выделенных районов Кольского Севера

Район	I, n=10		II, n=15		III, n=23		IV, n=12		V, n=7		VI, n=23		VII, n=7	
	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v
Al	30.56	± 0.56	85.62	± 1.41	49.75	± 0.71	40.70	± 0.99	66.00	± 0.81	66.41	± 1.12	32.48	± 0.39
Fe	47.26	± 1.20	118.34	± 0.77	101.55	± 1.08	35.62	± 0.94	83.71	± 0.68	98.71	± 0.82	86.87	± 0.60
Cu	0.94	± 0.72	1.00	± 1.09	1.22	± 0.95	1.40	± 0.84	4.23	± 0.65	3.16	± 1.16	1.48	± 1.23
Ni	1.06	± 1.00	2.33	± 1.48	2.63	± 1.06	1.19	± 0.94	7.22	± 0.74	4.42	± 2.63	2.58	± 1.67
Co	0.47	± 0.14	3.10	± 0.25	2.66	± 0.16	0.58	± 0.16	0.67	± 0.19	1.26	± 0.21	0.61	± 0.16
Zn	1.66	± 0.43	2.45	± 0.64	2.06	± 0.76	1.72	± 0.36	2.94	± 0.34	1.99	± 0.44	2.21	± 0.47
Mn	2.09	± 0.60	6.77	± 1.10	5.26	± 1.91	4.22	± 0.89	4.22	± 0.38	4.63	± 0.82	3.35	± 0.70
Sr	7.56	± 0.54	9.33	± 0.63	20.36	± 1.13	23.51	± 0.70	17.49	± 0.75	11.97	± 0.73	13.35	± 0.23
Pb	0.47	± 0.30	0.89	± 0.21	0.96	± 0.26	0.42	± 0.20	0.41	± 0.19	0.65	± 0.26	1.09	± 0.31
Cr	0.50	± 0.24	0.51	± 0.40	0.38	± 0.33	0.46	± 0.24	0.59	± 0.31	0.45	± 0.30	0.30	± 0.27
Cd	0.36	± 0.07	0.46	± 0.06	0.98	± 0.07	0.42	± 0.06	0.15	± 0.06	0.60	± 0.06	1.04	± 0.12
As	0.33	± 0.31	0.36	± 0.35	0.55	± 0.34	0.53	± 0.24	0.48	± 0.45	0.49	± 0.34	0.64	± 0.27
Br	2.03	± 0.24	2.19	± 0.37	1.94	± 0.27	4.57	± 0.35	1.48	± 0.14	7.33	± 0.51	9.33	± 0.30
Li	0.72	± 0.55	5.47	± 0.33	7.35	± 0.47	10.92	± 0.61	5.97	± 0.35	0.76	± 0.06	1.36	± 0.17
Se	1.10	± 0.36	0.97	± 0.42	0.94	± 0.87	0.63	± 0.59	1.36	± 0.16	0.86	± 0.47	1.09	± 0.43
Mo	0.55	± 0.16	0.85	± 0.39	0.85	± 0.26	0.95	± 0.13	1.31	± 0.38	0.74	± 0.14	0.28	± 0.24
U	1.01	± 0.02	1.03	± 0.05	1.33	± 0.05	3.01	± 0.03	1.51	± 0.06	2.75	± 0.03	0.72	± 0.03
Rb	1.07	± 0.31	1.84	± 0.84	1.20	± 0.72	2.04	± 0.36	0.99	± 0.75	1.47	± 1.20	1.02	± 0.29
Sb	0.69	± 0.11	0.55	± 0.06	0.88	± 0.06	0.48	± 0.06	0.37	± 0.03	0.70	± 0.06	0.80	± 0.09
Ba	5.08	± 0.31	3.89	± 0.63	6.49	± 0.49	9.36	± 0.64	8.76	± 0.10	8.20	± 0.80	10.64	± 0.67
Be	0.82	± 0.02	0.65	± 0.02	0.84	± 0.02	0.93	± 0.01	0.63	± 0.02	0.72	± 0.01	0.50	± 0.03
B	1.74	± 0.34	1.41	± 0.40	1.63	± 0.42	1.19	± 0.26	2.05	± 0.34	1.57	± 0.41	2.09	± 0.36
Sc	0.41	± 0.32	0.63	± 0.59	0.55	± 0.48	0.70	± 0.38	0.56	± 0.16	0.52	± 0.50	0.42	± 0.32
Ti	1.85	± 0.51	1.59	± 0.65	1.37	± 1.24	1.10	± 0.66	1.69	± 0.64	2.13	± 1.01	1.90	± 0.32

V	0.67	±	0.32	0.61	±	0.50	0.66	±	0.52	0.70	±	0.40	0.48	±	0.41	0.96	±	0.47	0.42	±	0.27
Sn	0.50	±	0.11	0.60	±	0.11	0.54	±	0.11	0.75	±	0.12	0.06	±	0.01	0.47	±	0.11	0.29	±	0.10
Ga	0.43	±	0.02	0.47	±	0.02	0.76	±	0.02	0.69	±	0.02	0.81	±	0.01	0.80	±	0.02	0.23	±	0.03
Y	0.43	±	0.06	1.72	±	0.10	0.80	±	0.09	1.19	±	0.04	0.67	±	0.08	0.87	±	0.08	0.32	±	0.06
Zr	0.46	±	0.07	0.57	±	0.08	1.47	±	0.09	0.34	±	0.07	0.28	±	0.07	0.45	±	0.07	0.27	±	0.05
Ag	0.57	±	0.06	0.51	±	0.04	0.83	±	0.01	0.45	±	0.03	0.52	±	0.01	0.54	±	0.05	0.62	±	0.05
Cs	2.19	±	0.94	2.29	±	0.36	2.47	±	0.60	3.75	±	0.65	3.23	±	0.86	2.56	±	1.45	2.40	±	0.41
W	0.61	±	0.02	0.97	±	0.03	1.92	±	0.03	0.34	±	0.02	0.65	±	0.02	0.58	±	0.02	0.60	±	0.02
Bi	1.06	±	0.57	1.11	±	0.99	1.11	±	0.79	0.78	±	0.46	1.46	±	0.97	0.85	±	0.68	1.27	±	0.53
La	1.36	±	1.29	2.09	±	0.70	3.81	±	0.61	1.71	±	0.56	3.30	±	0.72	0.93	±	0.54	1.07	±	0.74
Ce	1.63	±	0.97	1.96	±	0.84	3.85	±	0.74	4.90	±	0.59	3.33	±	0.78	2.80	±	0.73	1.25	±	0.97
Sm	0.83	±	0.02	1.23	±	0.05	0.73	±	0.03	0.70	±	0.03	0.50	±	0.03	1.27	±	0.03	0.51	±	0.04
Gd	0.46	±	0.04	1.36	±	0.04	1.66	±	0.04	0.92	±	0.02	0.41	±	0.03	1.03	±	0.87	0.61	±	0.03
Pr	1.21	±	0.10	1.78	±	0.09	3.18	±	0.07	1.37	±	0.06	2.80	±	0.09	2.36	±	0.08	0.44	±	0.12
Nd	0.54	±	0.17	1.79	±	0.28	1.59	±	0.19	0.86	±	0.12	0.51	±	0.18	1.72	±	0.22	0.49	±	0.22

* n – количество озер

4.2 Сопряженное поступление элементов в воды озер

Для выявления сопряженного поступления элементов в водные системы был проведен корреляционный анализ в пределах совокупности всех исследуемых элементов в водах 97 озер Кольского Севера за 2005 год (Приложение 2, табл. 15). Результаты корреляционного анализа показали значимые связи между отдельными группами элементов в зависимости от их электронного строения, геохимической распространенности в природе и антропогенных источников поступления. Для щелочных и щелочноземельных металлов корреляционный анализ показал, как значимы связи между собой за счет близости физико-химических свойств этих двух групп, так и связи с основными параметрами водных объектов (щелочность и рН). Закономерно, поскольку поток основных катионов $\sum_{\text{кат.}} (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{2+} + \text{K}^{2+})$ с водосбора определяет рН и щелочность вод. Совместно с Fe в воды суши мигрируют P, POB, Al, Zn, Mn, Rb, Ti, Re, Y, Nb, La что подтверждается достоверной связью между элементами ($r > 0.79$, $n = 97$, $p = 0.005$). С органическим веществом в этой группе элементов достоверную связь имеют Al, Fe, Ti, Re, Y, Nb, La ($r > 0.78$, $p = 0.005$, $n = 97$), что свидетельствует о преимущественном вовлечении этих элементов органическим веществом почв или связыванием с ним в процессе внутриводоемных биогеохимических реакций.

Элементы Al, Fe, Zn, Mn, Cd, Rb, Sb, Ti, Nb, Bi, La показывают тесную связь с фосфором ($r > 0.76$, $p = 0.005$, $n = 97$), что может быть следствием их миграции из рудных фосфорсодержащих месторождений Кольского Севера. Для Pb выявлены достоверные связи с элементами, которые содержатся в общих с ним минералах – Cd, Rb, Sb ($r > 0.84$, $p = 0.005$, $n = 97$), и многие из которых обладают аналогичным поведением в процессах выветривания, выщелачивания из почв и минеральных образований. As характеризуется достоверными связями с антропогенно-обусловленными элементами Cu, Ni, Se, V ($r > 0.80$, $p = 0.005$, $n = 97$). Sb имеет хорошую связь ($r > 0.78$, $p = 0.005$, $n = 97$) с P, Zn, Pb, Cd, Rb, Ti, Re, Nb, Bi, La. Достаточно высокая корреляционная

связь с сульфат-ионом характеризует такие элементы как: Cu, Ni, Se, As, Re ($r > 0.75$, $p = 0.005$, $n = 97$). С одной стороны, эти элементы могут рассеиваться в процессе переработки медно-никелевых сульфидных руд, которые имеют большой спектр сопутствующих элементов; с другой – иметь совместное распространение в горных породах Кольского Севера, имеющих богатый состав ценных минералов. Таким образом, распространение тех или иных пород в регионе, в первую очередь, предопределяет миграцию элементов в водные системы.

4.3 Факторы, определяющие поступление микроэлементов в воды озер

Для установления обогащения вод теми или иными элементами в природных условиях и (или) под воздействием техногенного рассеивания и выщелачивания кислотными осадками необходимо иметь данные по концентрациям элементов в водах в фоновые условия для региона. Учитывая, что Кольский Север подвержен многолетнему воздействию горнорудных и плавильных производств, сложно встретить водные объекты, которые могут служить, как фоновые озера. В наших исследованиях в качестве условно-фоновых значений были приняты, как упоминалось выше, значения, полученные для Норвегии и северной части Фенноскандии. 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).

- Сумма катионов характеризует природное насыщение вод обменными основаниями и процессы химического выветривания пород, включая металлы.
- Показатель кислотнейтрализующей способности вод (ANC), характеризует буферную емкость вод и способность к нейтрализации кислотных осадков, причем высокие значения ANC характеризуют воды с высокой минерализацией, низкие и

отрицательные значения характеризуют антропогенное закисление вод.

- Концентрации техногенных сульфатов в воде (SO_4^{2-*}), которые после коррекции на устранение солей морского происхождения, являются информативным показателем выпадения техногенных кислот на водосборы и характеризуют активизацию процессов химического выщелачивания кислотными осадками.
- Содержание растворенного органического вещества (POB), TN, TP, которые играют значимую роль в биотическом круговороте элементов и распределении металлов.

В целом по Кольскому региону был проведен факторный анализ по 26 ключевым элементам (табл. 16). 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. Например, из группы лантаноидов был выбран La, из металлоидов – As, из щелочных – Rb. Целью применения факторного анализа было выделение основных факторов, определяющих структуру взаимосвязей между факторами среды и содержаниями элементов. Значимыми факторными нагрузками были те, квадрат коэффициента корреляции которых был больше 0.5 при достоверности $p < 0.05$. В процессе обработки данных было выделено 4 фактора со следующими процентами объясняемой дисперсии: 1 фактор – 55.3 %; 2 фактор – 17.7 %; 3 фактор – 14.6 %; 4 фактор – 8.8 %.

Фактор № 1 определяет влияние ландшафтно-геологической структуры на миграцию большей части микроэлементов, что закономерно (более 50 % общей дисперсии). Низкая щелочность и, соответственно, кислотонейтрализующая способность вод, способствуют повышению миграционной активности большинства элементов, включая P. Согласно анализу, на миграцию элементов оказывает и органическое вещество. Можно предположить, что гумусовые кислоты способствуют также вовлечению

элементов в транспортные потоки с водосборов, которые обогащены рудными включениями. Воды озер заболоченных и лесных территорий Кольского региона, характеризуются высоким содержанием органических веществ, низким содержанием щелочности и кислотнейтрализующей способности. В этих условиях элементы более активно выщелачиваются в воду из геологических формаций.

Фактор № 2 отражает особенности локальной аэротехногенной нагрузки на природные воды. Этот фактор определяет повышенные содержания элементов (Cu, Ni, As, Se, V), которые сопутствуют выбросам плавильных медно-никелевых комбинатов. Закономерно, что эти элементы связаны положительно с рН вод. Это может объясняться их распространением в составе дымовой эмиссии от медно-никелевых производств.

Фактор № 3 характеризует влияние выпадения техногенных сульфатов, которые приводят к снижению насыщения вод обменными основаниями, щелочности и соответственно - кислотнейтрализующей способности вод. Закисление вод проявляется за пределами пылевой эмиссии от производств в озерах, подстилающие породы которых сложены гранито-гнейсовыми и песчаными формациями. В этих условиях выщелачивание элементов происходит медленно. В то же время положительная, хотя и слабая, прослеживается связь с Cd и Pb. Можно предположить, что на восточные регионы оказывают влияние трансграничные переносы и обогащение северных регионов этими элементами.

Фактор № 4 имеет низкий процент объяснимой дисперсии. Значимость вклада различных элементов и параметров химического состава вод незначительный. Этот фактор доказывает, что поток техногенных сульфатов в воде озер в ряде случаев приводит увеличению содержаний Cu, Ni и Pb и повышению рН.

Таким образом, на основе сочетания результатов корреляционного и факторного анализа были обоснованы ключевые факторы, определяющие

сопряженные потоки различных элементов в озера в зависимости от геолого-геохимических и ландшафтных условий водосборов, а также техногенной нагрузки.

Таблица 16. Факторные нагрузки (значимые выделены жирным шрифтом), собственные значения и процент объясняемой дисперсии четырех факторов

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	-0.414	0.690	-0.315	0.501
$\Sigma_{\text{кат}}$	-0.426	0.429	-0.729	0.127
АК.	-0.720	0.352	-0.558	-0.167
$\text{SO}_4^{2-}_{\text{техн}}$	0.155	0.371	0.538	0.657
TP	0.953	-0.061	0.087	0.118
POB	0.773	-0.142	-0.590	-0.049
ANC	-0.516	0.329	-0.742	-0.273
Al	0.862	-0.122	-0.423	0.142
Fe	0.889	-0.122	-0.434	-0.011
Cu	0.012	0.873	0.106	0.470
Ni	0.126	0.834	0.120	0.520
Zn	0.963	-0.087	0.145	0.188
Mn	0.843	-0.296	-0.037	0.439
Pb	0.733	0.220	0.367	0.519
Cd	0.861	0.172	0.477	0.012
As	0.529	0.806	0.232	0.124
Se	0.430	0.848	0.303	-0.045
Rb	0.890	0.105	-0.043	-0.412
Sb	0.949	0.035	0.209	-0.197
Ti	0.922	0.312	-0.173	0.126
V	0.739	0.540	-0.324	0.058
Re	0.826	0.012	-0.404	-0.388
Y	0.862	-0.026	-0.452	-0.010
Nb	0.916	-0.173	-0.206	-0.149
Bi	0.751	-0.256	0.246	-0.111
La	0.933	-0.127	-0.298	0.155
Собственные значения	14.4	4.6	3.8	2.3
% объясняемой дисперсии	55.3	17.7	14.6	8.8

В таблицах 17-23 (приложение 3) приведены результаты факторного анализа, рассчитанные для каждого из выделенных районов и отражающие тесноту связи между основными показателями химического состава вод и содержанием микроэлементов в воде озер выделенных районов. Значимыми факторными нагрузками были те, квадрат коэффициента корреляции которых был больше 0.5 при достоверности $p < 0.05$. Показатели в таблице

расположены в порядке убывания коэффициента корреляции, причем на первом месте стоят основные показатели химического состава воды (рН, Σ кат, SO_4^* , ANC, POB, TN, TP), которые отражают ландшафтно-геохимические особенности формирования вод (табл. 24). С большой долей вероятности в каждом районе удалось выявить ведущие факторы, которые влияют на миграционную активность элементов. Следует отметить что, несмотря на условное подразделение Кольского Севера на природно-климатические зоны, в той или иной степени близлежащие районы и связанные с ними породы могут накладываться и влиять 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 I района наибольший вклад в объяснимую дисперсию (30 %) вносят POB и низкие рН вод. С этими показателями взаимосвязана небольшая группа элементов (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 которыми взаимосвязаны концентрации Ni и Cu, а также Al, Fe, Y, Ru.

В районе II вследствие высокой доли заболоченности территории (наличие торфянистых и болотных почв), а также лесных массивов повышается роль 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 кислотонейтрализующей способности (фактор 1) определяют процесс закисления вод и миграционную активность таких элементов как Sb, As, Cd. Известно, что кадмий является достаточно лабильным элементом и активно выщелачивается в воду кислотными осадками (Satarug et.al, 2003; Besser et. al., 2007).

Органическое вещество способствует переходу в воду Al, Hf и редкоземельных элементов (Sc, Y, Gd, Sm, Pr), а также металлов Fe, Mn. Третий фактор показывает, что влияние техногенных сульфатов и низких pH не высоко (этот фактор имеет только 9 % объяснимой дисперсии), что оказывает свое влияние на миграцию Pb и Zn.

Для III района определяющую роль играет разнообразие геологической структуры (рудноносных пород) и залесенность, что подтверждается высоким процентом объяснимой дисперсии (фактор № 1, 51% объяснимой дисперсии). В этой зоне органическое вещество 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, 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 IV районе ведущую роль, играет первый фактор, который дает 29% объяснимой дисперсии и отражает общие закономерности формирования природных вод, обусловленные разнообразием пород. В воде озер вследствие высокой буферной емкости щелочных гранитов и сиенитов, произошло обогащение вод элементами Ba, V, Th, Rb, Ti и редкими землями Sm, Gd, Pr, Nd, Sc. Эти породы характеризуются низкой твердостью и легко выщелачиваются. Второй фактор (22%) дает объяснение влиянию органического вещества, которое способствует вовлечению в транспортные потоки ряда элементов. Выбросы техногенной серы в данном районе оказывают опосредованное влияние. Фактор № 3 (17% объяснимой дисперсии) определяет совокупное влияние техногенных сульфатов и биогенных элементов (TN, TP), которые способствуют выщелачиванию Mo, Cd, Sn.

Озера, находящиеся в зоне влияния горнопромышленного комплекса (V район) характеризуются взаимосвязанным увеличением содержания большой группы элементов. На усиление потока элементов в воду основное воздействие (фактор 1, 42 % объяснимой дисперсии) оказывает совокупное влияние локальной аэротехногенной нагрузки и содержанием почв органического вещества в почвах (Stumm, Morgan, 1996). С этими факторами 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. Фактор 2 отражает свойства элементов совместно выщелачиваться в воду в составе катионов, включая Cu, Ni. Не исключено, что влияние второго фактора может быть связано с пылевой эмиссией, которая приводит к насыщению вод катионами, Cu, Ni, а также повышению pH.

В VI и VII районах фактор 1 определяет совокупное влияние геологической структуры водосборов и кислотное выщелачивание элементов. В VI районе получен максимальный % объяснимой дисперсии (58 %) среди всех районов, что подтверждает ключевую роль влияния аэротехногенного источника загрязнения на поступление Sb, Be и редких земель (Sc, 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). Низкая кислотонейтрализующая способность вод, характерная для обоих районов, способствует увеличению содержания большой группы элементов в озерах, расположенных в зоне влияния комбината «Печенганикель» (VI район). В озерах, расположенных в VII районе влияние со стороны горнопромышленных предприятий сказывается в меньшей степени. В воде озер, расположенных в VI и VII районах, 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 показывает интенсивность поступления потока элементов с водосборов в составе катионов. Техногенные сульфаты, а также пылевая эмиссия оказывают влияние на увеличение содержания Cu, Ni. В воде озер также отмечается увеличение содержания металлов (Fe, Cu, Ni), редких земель (Sc, Sm, Y, Pr, Gd), а также литофильных (Al, Zr). Источники распространения этих элементов в воде озер могут быть как промышленного происхождения (апатит-нефелиновые фабрики, транспортные магистрали), так и природного (пыление нарушенных эрозией почв) (Доклад, 2006).

Фактор 3 в VI и VII районах характеризует биотическую миграцию элементов, а также локальный характер антропогенной нагрузки на водосборы по содержанию органического вещества и связанных с ним металлов (Y, Pb, Pd, Ru, Cr, Al).

Таблица 24. Взаимокоррелируемые компоненты в выделенных районах Кольского Севера

Район	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
I	Сорг.(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)
	<i>F - 30 %</i>	<i>F - 17 %</i>	<i>F - 10 %</i>
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), Сорг.(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)
	<i>F - 33 %</i>	<i>F - 18 %</i>	<i>F - 9 %</i>
III	Сорг.(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)
	<i>F - 51 %</i>	<i>F - 18 %</i>	<i>F - 11 %</i>
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)	Сорг.(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)
	<i>F - 29 %</i>	<i>F - 22 %</i>	<i>F - 17 %</i>
V	SO₄* (0.64), Сорг.(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)
	<i>F - 42 %</i>	<i>F - 19 %</i>	<i>F - 13 %</i>
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)	Сорг.(0.70), TP(0.69), TN(0.55), Y(0.79), Pb(0.70), Pd(0.65), Ru(0.61), Cr(0.51)
	<i>F - 58 %</i>	<i>F - 18 %</i>	<i>F - 11 %</i>
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)	Сорг.(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)
	<i>F - 33 %</i>	<i>F - 18 %</i>	<i>F - 9 %</i>

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

4.4 Оценка миграционной активности элементов в природных водах в зависимости от геохимических особенностей региона

Для исследования взаимодействия пород, слагающих водосборы озер с водой с целью оценки миграции элементов, было рассмотрено соотношение w/r , где w – содержание элемента в воде (%), r – содержание элемента в горной породе (%) (табл. 25). В распределении микроэлементов в воде озер удалось выявить сходства и различия в интенсивности миграции, приуроченных к кислым породам (преимущественно гранитам и гранодиоритам), гнейсовым комплексам и породам разного состава (кислым и щелочным породам). Химические составы горных пород, слагающих водосборы озер представлены в приложении 3 (табл. 26).

В воде озер фоновых районов (I и II) отмечены сходства. Элементы Mn, Zr, Ti, Cu, Ni, V, Cr, характеризуются низкой миграционной способностью. Учитывая тот факт, что озера, относящиеся к фоновым районам, находятся на значительном удалении от комбинатов, источниками поступления большой группы элементов является выветривание и ветровая эрозия, техногенные пустоши. Кроме того, эти элементы в небольшом количестве содержатся в гранитосодержащих породах, причем кислая среда замедляет миграцию.

Самое низкое содержание в воде озер I района характерно для Al, более высокая миграционная способность характерна для Fe, Cu, V, Ni. Высокая подвижность Pb, Zn в районах, приуроченных к Апатитам и Кандалакше вероятнее всего связано с интенсивностью автомобильного транспорта (Мурманск, Кандалакша). Самая высокая миграционная способность характерна для Cs, La, Ce, которые являются основными компонентами кислых пород и в условиях кислой среды свободно переходят в воду. Хорошими миграционными свойствами обладает P, что скорее всего связано с наличием фосфорсодержащих месторождений и близостью расположения Ловозерских и Хибинских щелочных массивов, плохими мигрантами являются Fe, Na, K, Sr, Si.

В озерах таежной (III) зоны в силу ландшафтно-геохимических особенностей наблюдается увеличение содержания Li, Zn, La, Ce. Элементы Cr, Zr обладают плохой подвижностью.

В силу контрастной геологической структуры (наличие щелочных и кислых пород) IV района в воде озер отмечены различия в распределении элементов. Для озер, приуроченных к кислым породам характерна низкая миграционная способность элементов Ba, B, Rb, Cr, V, Y, Nd, Sc, Pb. Эти элементы входят в состав гранитосодержащих пород и сланцев, вследствие физико-химических свойств самих элементов по А.И. Никанорову (2001) считаются малоподвижными. В озерах, водосборы которых сложены щелочными породами отмечено увеличение содержание элементов вследствие высокой буферной способности пород.

Озера, находящиеся в непосредственной близости от комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» (V и VI районы) характеризуются повышенными содержаниями Na, Mg, Ca, Sr, Al, Fe. Повышенное содержание Cu, Ni, Co, Cr является результатом функционирования горнорудных производств. Высокая мобильность характерна для элементов P, V, Pb, Cr, Co, Zn, Sc, La, Ce, Nd, которые поступают в воду с пылевыми выбросами с комбинатов, а также входят в состав щелочных пород и сланцев. Поступление в воды Zn вероятнее обусловлено выбросами с комбинатов, а также в результате биогеохимической миграции. Остальные элементы преимущественно содержатся в гнейсах и сланцах, а их поступление в воду происходит в процессе рассеивания от комбинатов, а также вследствие ветровой эрозии.

Элементы Ni, Cu, Co, Cr, V являются типичными компонентами аэротехногенных выбросов горно-металлургических предприятий по переработке медно-никелевых руд. Примечательно, что наибольшая подвижность этих элементов (соотношение от 1 до 10) отмечена в районах V и VI, где зафиксирован максимальный уровень аэротехногенной нагрузки.

Это в первую очередь дает представление об уровне накопления элементов и степени экологической опасности территорий, подверженных воздействию.

Основным источником распространения Sr, Be, Rb, La, Ce, Nd в V и VI, районах является «пыление» различных объектов. Степень атмосферного загрязнения пылью может быть, как промышленного (транспортные магистрали, апатит-нефелиновые фабрики, карьеры, хвостохранилища), так и природного (пыление почв, нарушенных эрозией) происхождения. Такая нагрузка в основном сосредоточена в центральной части Мурманской области, где расположены города Мончегорск, Кировск, Апатиты.

Воды озер, расположенные в лесотундровой зоне (VII район), характеризуются схожими особенностями распределения элементов с озерами, находящимися в зоне влияния комбинатов. Высокая подвижность отмечается для щелочно-земельных (Ca, Mg, Ba, Sr), которые являются хорошими мигрантами вследствие особенностей ландшафтно-геологической структуры (они в значительном количестве входят в состав эндербитов). На территории района хорошо развита речная сеть, территория вокруг озер и водоразделы рек заболочены, почвы преимущественно иллювиально-гумусовые маломощные.

Таблица 25. Интенсивность водной миграции элементов в целом для Кольского Севера и в выделенных районах

w/r	I	II	III	IV	V	VI	VII
>100	Cs(130)	P(522)			Mg(118)		Na(777), Zn(136)
10-100	Na(24),La(24), B(21),Ce(19), Rb(14),Pb(10)	Cs(35),Mg(26)	Zn(57),Mg(35) Ca(23),Na(22)	Ca(23),Na(20), Mg(17)	Ca(49),Na(28), Mn(27),Sr(19), Cs(16),Fe(11)	Na(63),Cs(38), Ca(23)	Cs(73),Sr(43), Rb(32),Ce(29), La(25),K(23), B(19),Ba(6)
1-10	Zn(6,9),Sr(6.3), Sc(4.8),Li(3.9), Ca(3.8),Mg(3.3), Nd(3.2),K(2.2), Mn(1.5),Y(1.4)	Zn(7.2),B(6.8), Ca(5.8),Na(4.9), Cu(4.3),Mn(4.2)	Mn(10),La(8.4), Ce(8.0),Li(6.2), P(4.8),Nd(4.2), Ni(2.7),K(2.6) Cu(1.5),V(1.3), Fe(1.3)	K(5.8),Li(1.3), Mn(1.2),Sr(0.9), P(0.8),Si(0.7), Zn(0.3)	K(5.2),Sc(4.8), Ni(4.2),Li(3.7), B(3.6),Cu(2.5), Cr(2.3),Zn(1.9), V(1.7),Si(1.4), La(1.2),Rb(1), Y(1),Zr(1)	Sr(8.2),Mg(8.1), Mn(6.9),K(6.5), Li(4.1),Ni(3.2), Cu(2.7),B(2.5), Sc(2.3),La(1.8), Zn(1.7),Cr(1.6), Rb(1.4),V(1.2), Nd(1.1)	Ca(9.9),Li(8.2), Mg(6.3),Nd(2.4), Ni(2.1),Si(1.3),
0.1-1.0	Ni(0.87),P(0.64), Cr(0.58),V(0.52), Si(0.46),C(0.44), Fe(0.14)	La(0.98),Rb(0.94), Pb(0.92),Sc(0.91), Ba(0.66),Ce(0.57), Li(0.46),Al(0.34), Cr(0.29),Nd(0.26), V(0.21),Ni(0.12), Y(0.11)	Sr(0.87),Rb(0.66), B(0.59),Pb(0.54), Si(0.45),Ba(0.24), Ti(0.24),Al(0.14)	Fe(0.31),C(0.30), Ni(0.23),La(0.17), Rb(0.15),Sc(0.13), Ce(0.12),Al(0.11), Pb(0.10)	La(1.24),Rb(1.00), Y(1.00),Zr(1.00), Ba(0.92),Pb(0.87), Ce(0.83),Nd(0.80), P(0.50)Ti(0.44), Al(0.11)	Ce(0.97),P(0.82), Si(0.81),Ba(0.81), Pb(0.50),Fe(0.41), Y(0.39),Al(0.28), Ti(0.12)	P(0.89),Mn(0.85), Fe(0.51),Pb(0.36), Cu(0.20),Cr(0.20), V(0.16),Ti(0.12), Al(0.10)
<0.1	Al(0.06),Zr(0.05), Ti(0.03)	Ti(0.08),Si(0.04), Sr(0.04),Zr(0.03), K(0.02),Fe(0.01)	Cr(0.09),Zr(0.03)	-	Ti(0.09),Ba(0.07), Nd(0.05),Y(0.04), B(0.03),V(0.03),	-	Zr(0.08)

5.5 Влияние закисления на поведение микроэлементов в воде озер

Для оценки влияния природного и антропогенного закисления на распределение элементов в воде были выбраны 4 озера. На рисунке 13 представлены данные по содержанию элементов в двух антропогенно-закисленных озерах, геологическая структура которых представлена в одном случае гранитами, в другом - песчаными формациями, а также – в природно-подкисленном озере. Для сравнения приведены данные по всей совокупности озер Кольского Севера (средние значения), а также по содержанию элементов в нейтральном озере.

В целом для природных вод Кольского региона характерно высокое содержание элементов, которые поступают из слагающих различных металлогенных пород и сопутствуют дымовым выбросам медно-никелевых комбинатов, в первую очередь - As, Ni, Ti. Основные породы, с одной стороны способны к нейтрализации кислотных выпадений, с другой - обуславливать химическое выщелачивание большой группы элементов. Возможно, кислотные осадки способствуют более активному выщелачиванию в воды таких элементов, как Pb, Cd, As, Bi, Y, Zr, La, Ce. Нейтральное (pH=6.68) гидрокарбонатно-кальциевое озеро (1) приурочено к основным породам, которые способствуют быстрому выщелачиванию катионов и микроэлементов. В воде озера наблюдаются повышенные содержания Rb, Ba, V, La, которые сопутствуют основным щелочным элементам.

Закисленное хлоридно-натриевое озеро (2) северо-восточной тундры, воды которого уязвимы к кислотным выпадениям в силу особенностей геологической структуры слагающих пород, представленных гранитами. Это озеро характеризуется низкой буферной емкостью и кислотонейтрализующей способностью вод, низкой цветностью вод (pH=5.66). Несмотря на низкую способность гранитов к химическому выщелачиванию, в воде содержатся повышенные содержания Zn, Pb, As, Sb, V, Rb. Это может быть связано как с кислотным выщелачиванием, так и воздушным распространением элементов.

Сульфатно-натриевое озеро (3) таежной зоны, располагающееся на кварцевых песках, в наибольшей степени закислено. Воды озера характеризуются низкими содержаниями основных катионов в воде, низким значением рН (менее 5) и органического вещества. Следует отметить более высокое содержание в воде алюминия, что характерно для антропогенно-закисленных озер, содержания остальных элементов низкие. Воды озер, водосборы которых приурочены к перемытым кварцевым породам, слабо обогащаются элементами.

Озеро (4) лесных и заболоченных массивов, несмотря на низкие значения рН (5.49) характеризуется более высокой буферной емкостью. Высокое содержание РОВ (18.7 мгС/л) характеризует озеро как природно-подкисленное вследствие высокой заболоченности водосбора. В этом озере отмечены самые высокие концентрации алюминия. Наличие торфянистых и болотных почв на водосборе обуславливает обогащение вод гумусовыми веществами, которые активно вовлекают в транспортные потоки ряд элементов. Природно-подкисленное озеро (4) характеризуется более высокими содержаниями в воде РОВ, Al, Fe, Mn и особенно элементов Ba, Cr, Ti, Y, La, Ce.

Исходя из изложенных материалов, можно заключить, что антропогенно-закисленные озера характеризуются более низкими содержаниями элементов в воде озер как следствие устойчивости пород гранитных и песчаных формаций к химическому выветриванию. Повышенные концентрации элементов Zn, Pb, Cd, As, Bi, Sb, Cd могут формироваться как вследствие воздушного их распространения с дымовыми выбросами местных плавильных и трансграничными переносами, так и кислотного выщелачивания. Ряд публикаций (ЕМЕР Heavy metals, 2004; Мур и Рамамурти, 1987) показывает обогащение северных регионов большой группой металлов из-за глобальных процессов рассеивания металлов.

Воды природно-подкисленного озера заболоченных и лесных водосборов с высоким содержанием гумусовых кислот обладают более

высокой буферной емкостью и характеризуются повышенным содержанием многих элементов, особенно Al, Fe, Mn и Ti. По данным А.И. Перельмана (1989) эти элементы активно участвуют в биогенной миграции и вовлекаются гумусовыми кислотами в транспортные потоки. Воды озера содержат высокие значения элементов Ni, Zn, Ba, Cr, Ti, Y, Zr, La, Ce, которые не имеют широкого распространения в земной коре. Это в первую очередь связано с разнообразием горных пород Кольского Севера, определяющих вариабельность химического состава вод, а также наличием на водосборе болотных массивов, из которых элементы активно вовлекаются в транспортные потоки. Исходя из изложенного можно заключить, что вне зависимости от природного или техногенного закисления, кислотные свойства вод усиливают миграционную активность элементов.

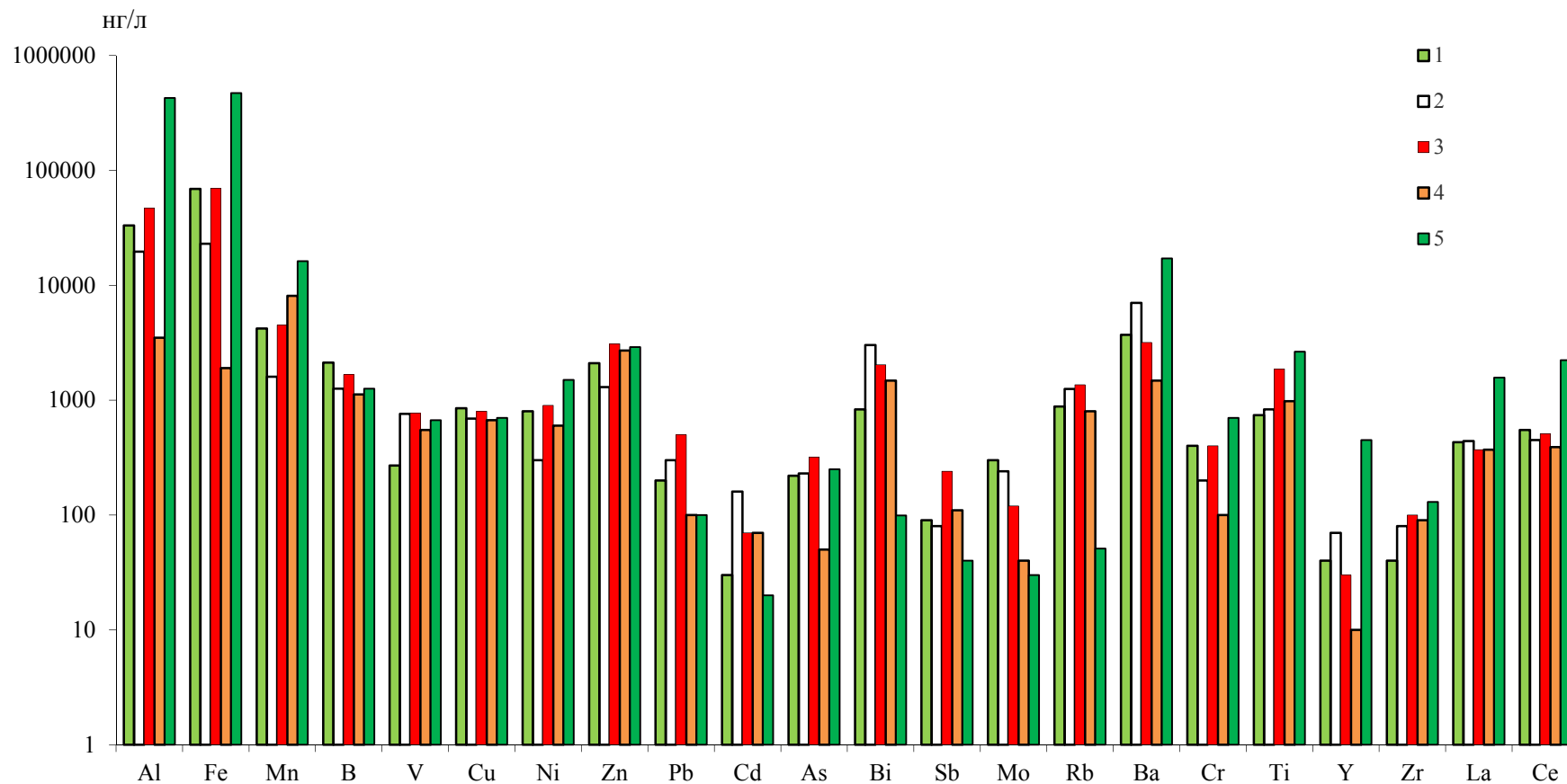


Рис. 13. Распределение элементов в воде озер Кольского Севера (значения представлены в нг/л в логарифмической шкале): 1 – в целом по региону, 2 - нейтральное (основные породы), 3 - антропогенно-закисленное (граниты), 4 - антропогенно-закисленное (кварцевые пески), 5 - природно-подкисленное (граниты)

4.6 Оценка экотоксичных свойств элементов

В системе мониторинга измеряется ограниченное количество элементов, которое не дает представление об опасности загрязнения водной среды металлами и металлоидами. Многие элементы, содержащиеся в природных объектах, способны вовлекаться в биогеохимические циклы и накапливаться в живых организмах, а также оказывать прямое токсическое действие и обуславливать отдаленные негативные последствия (Моисеенко, 1999). Элементы подразделяются на эссенциальные (биофильные) и не-эссенциальные (токсичные). К первым относится большая группа металлов, таких, как Fe, Co, Cu, Cr, Mn, Zn и др. В небольших концентрациях эти элементы не оказывают токсического воздействия на живые организмы, а наоборот, являются необходимыми для нормальной жизнедеятельности организмов.

К последним относятся элементы Cd, As, Pb которые представляют наибольшую опасность. Кадмий (Cd), является токсичным и достаточно лабильным элементом. В последние десятилетия установлены факты его активной миграции в водные объекты, обусловленные кислотными осадками, а также поступлением в окружающую среду с удобрениями. Многие литературные данные свидетельствуют о высоком уровне накопления этого элемента в водных объектах и, соответственно, в живых организмах. Кадмий способен замещать кальций в метаболических процессах, механизм его токсического действия связан с ингибированием переноса кальция протеинами (Мур, Рамамурти, 1987; Satarug et.al., 2003). Мышьяк (As) вызывает широкий спектр заболеваний: кишечные расстройства, печеночную недостаточность, параличи, вестибулярные расстройства. Свинец (Pb) — высокотоксичный элемент, который постепенно накапливается в природных водах, оказывая негативное воздействие на живые организмы. Накопление свинца в организмах приводит к разрушению клеточных органелл в результате снижения интенсивности синтеза протеиновых белков (Моисеенко и др., 2006).

Основными техногенными источниками природных экосистем являются горнорудная и химическая промышленность, отходы, стоки с предприятий, выбросы. Последствия такого загрязнения выражаются в изменении содержания химических элементов в воздухе, воде и почве. Результатом техногенного воздействия на состояние водных объектов является изменение различных показателей химического состава вод, особенно металлов. Показатель предельно допустимых концентраций (ПДК) характеризует пределы содержания элементов в воде, при которых не происходит патологических изменений в организме (Никаноров, 2001). В данном исследовании не выявлено концентраций металлов, превышающих ПДК, что свидетельствует об отсутствии потенциальных воздействий на водную экосистему в целом. В то же время может наблюдаться суммарное воздействие группы металлов, способное создавать токсичные условия для обитателей вод (Моисеенко и др., 2006; Птицын, 2006).

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). 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. 14).

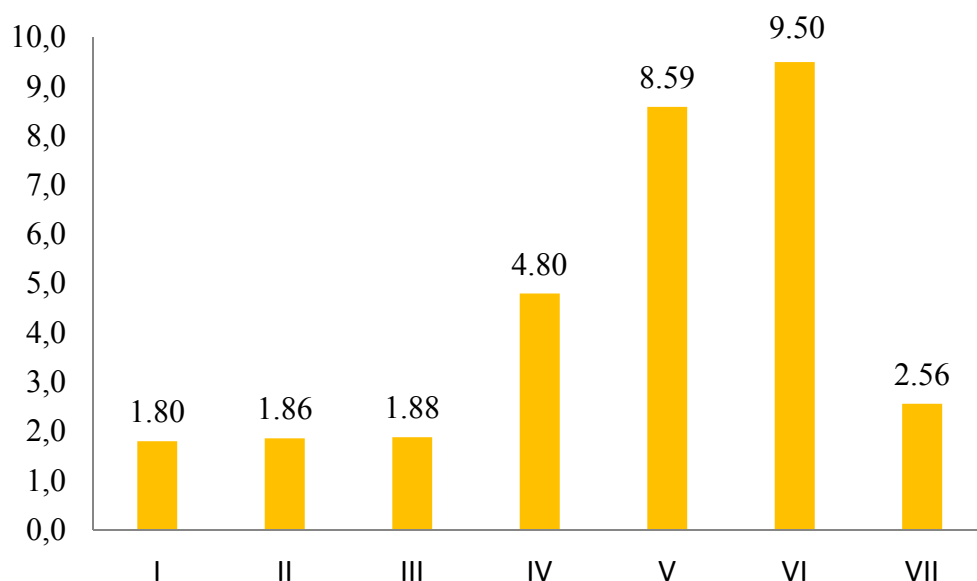


Рис. 14. Распределение индекса токсичности вод в различных ландшафтно-геохимических районах Кольского Севера

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 удаленностью от аэротехногенного источника загрязнения. К рассчитанному показателю нужно относиться с определенной долей критики, поскольку в ГОСТ не заложено, что наибольшую экологическую опасность представляют именно ионные формы, которые преобладают в низко минерализованных водах Севера.

Выводы:

Влияние выпадения кислых осадков проявляется в районах, в которых расположены крупные медно-никелевые производства. В связи с этим озера, находящиеся в непосредственной близости от горно-металлургических предприятий, характеризуются повышенными содержаниями Cu, Ni, Se, Bi как результат пылевой эмиссии и кислотного выщелачивания осадками. Также воды обогащены такими элементами, как Sr, Cs, Li, Ba, B, Zn, Mn, Ag, La, Ce, Pr.

Озера, расположенные в заболоченных регионах, характеризуются более высокими содержаниями Al, Fe, Co, Zn, Mn, Cr, вследствие повышенной природной кислотности вод и соответственно содержания гумусовых веществ, которые вовлекают в транспортные потоки большую группу элементов. В водах, приуроченных к фоновым районам, концентрации микроэлементов минимальны, что связано с их меньшей подверженностью кислотному выщелачиванию.

Для закисленных озер, подстилающие породы которых преимущественно сформированы гранитами, несмотря на высокую устойчивость к химическому выветриванию, характерна высокая интенсивность водной миграции элементов. Высокую и очень высокую интенсивность водной миграции в закисленной воде имеют элементы Cd, Sn, Sb, Bi, Se, Re, V, Ni, Co, которые выщелачиваются кислотными осадками.

Глава 5. Экспериментальное подтверждение геохимических особенностей выщелачивания элементов

Увеличение промышленного производства сопровождается выбросами в атмосферу загрязняющих веществ и кислотообразующих газов SO_2 и NO_x . Они поступают в атмосферу вследствие функционирования тепловых электростанций, горнорудных производств, промышленных предприятий. Окислы серы и азота, вследствие реакции взаимодействия с парами воздуха превращаются в кислоты, понижающие pH атмосферных осадков. Осадки, попадая на землю, вовлекают многие элементы, включая металлы в миграционные потоки, которые оказывают негативное воздействие на живые организмы. В то же время происходит процесс нейтрализации кислотных дождей, который происходит в результате взаимодействия кислых растворов с породами. Геохимические особенности пород влияют на быстроту нейтрализации кислотных дождей. Медленнее всего происходит реакция с гранитными и гнейсовыми породами (Моисеенко, 2003).

Для подтверждения закономерностей нейтрализации осадков и интенсивности выщелачивания элементов 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).

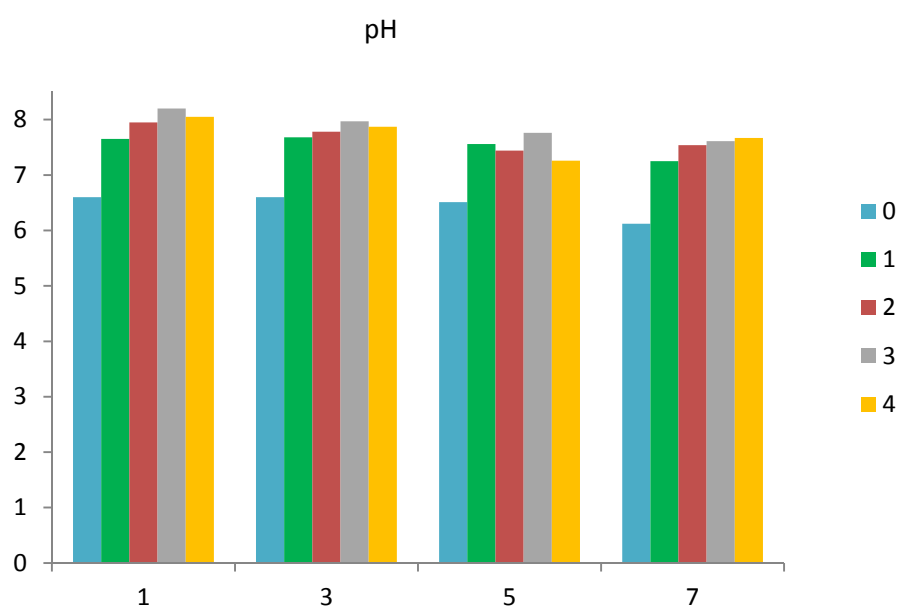
5.1. Характеристика пород и их кислотные способности

По основному составу исследуемые породы значительно отличаются друг от друга (приложение 3, рис.15-18). Наибольший разброс в содержаниях обнаружен для CaO , NaO , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO . Щелочные породы существенно обогащены Na, Al, Ti относительно гранитов. Фояйит отличается повышенным содержанием Mn. Уртит характеризуется повышенным содержанием P и Ti и преобладанием Na и Al над остальными

породообразующими элементами. Териберские и серебрянские граниты отличаются увеличением содержания серы и более низким содержанием Mn.

Основной и микроэлементный состав вод дает предварительное представление о геохимических особенностях формирования вод. Геохимический состав породы отражает сильную вариабельность содержания элементов. Для выявления различий распределения элементов в нейтральной и кислой средах был проведен сравнительный анализ концентраций элементов при взаимодействии с различными типами пород. Результаты измерения pH в пробах показывают динамику выщелачивания элементов (рис. 19). Было установлено, что в большая группа элементов выщелачивается в 1 неделю обработки как в нейтральной, так и в кислой среде, о чем свидетельствует снижение кислотности в пробах.

а)



б)

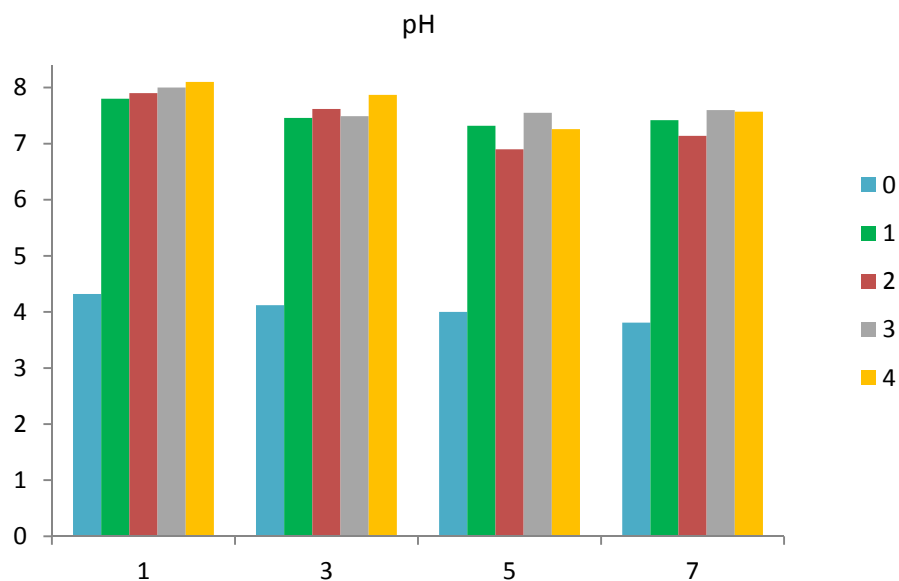


Рис. 19. Распределение pH в а) дистиллированной воде и в б) растворе разбавленной серной кислоты: 0 – «холостая проба», при взаимодействии с 1 – фойяитом, 2 – уртитом, 3 – териберскими гранитами, 4 – серебрянскими гранитами; 1,3,5,7 – недели

5.2. Результаты и обсуждение

Фойяиты – щелочной тип пород, встречающийся в Хибинских массивах. В нейтральной и кислой среде отмечены различия в содержании элементов (табл. 27). Увеличение содержания в кислой среде таких щелочных элементов, как Na и K, произошло после 1 недели обработки. Интенсивность миграционной активности щелочных (Rb, Cs), щелочноземельных (Ca, Ba) и некоторых анионогенных элементов (Sb, Sn) нарастала с 5 по 7 неделю обработки. Выщелачивание в нейтральной среде V и As произошло после 1 недели обработки, редких земель Pr, Nd, Dm, Gd, Tb, Dy к 3 неделе. Определяющим фактором являются физико-химические свойства элементов (Перельман, 1989) и хорошие буферные свойства щелочных пород.

Таблица 27. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с фойяитом

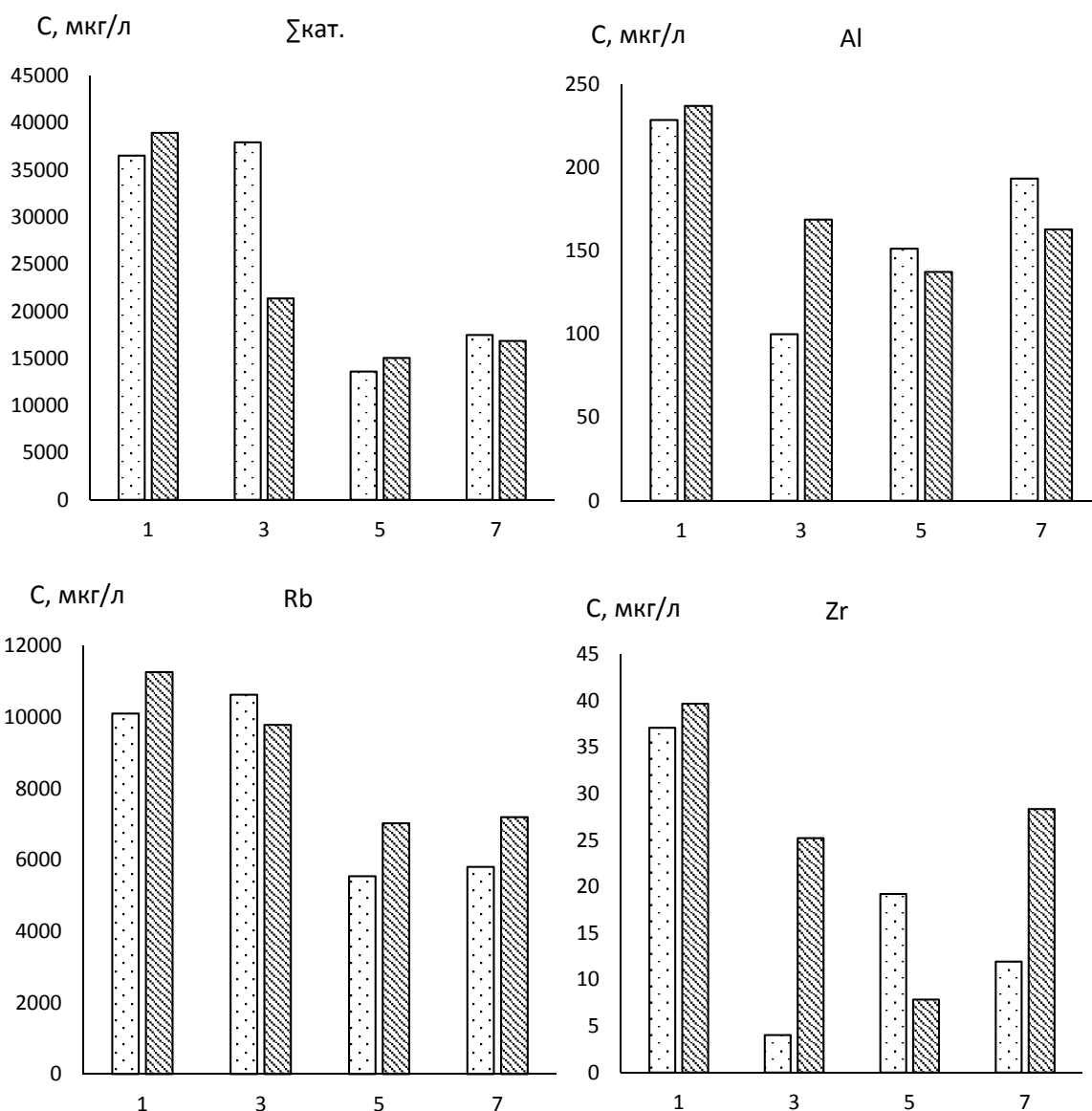
Элемент	1 неделя		3 неделя		5 неделя		7 неделя	
	1	2	1	2	1	2	1	2
B	15.48	28.11	1.64	11.01	-	6.37	-	9.91
Na	26474	28045	27448	11278	7306	6720	7717	7187
Mg	269	211	408	253	220	254	108	348
Al	228	237	100	169	151	137	193	163
Si	3166	3206	2624	2546	2133	2565	2378	3183
P	-	-	-	-	-	-	-	-
S	909	480	395	454	284	41	1871	275
K	7042	7455	7044	6011	3010	3681	3199	4054
Ca	2730	3223	6472	3833	3035	4397	3071	5269
Sc	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-
V	0.50	0.28	0,22	0,21	0,20	0,20	0,37	0,28
Cr	2.07	1.87	-	-	-	-	-	-
Mn	5.76	10.13	36,41	17,99	15,52	23,80	15,12	29,89
Fe	-	-	20,32	-	18,40	12,42	35,66	62,43
Co	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	0.80	74.25	-	1.91	-
Zn	-	25.01	-	1.53	12.22	-	-	-
Ga	1.68	1.62	0.55	0.87	0.73	0.61	0.72	0.55
Ge	-	-	-	-	-	-	-	-
As	0.29	0.07	0.21	-	0.14	-	0.10	-
Se	-	-	-	-	-	-	-	-
Br	-	-	9.73	-	-	-	-	-
Sr	863	1184	2301	1587	1052	1789	1097	1846
Ba	5.82	6.61	14.32	5.82	5.51	5.39	6.42	7.86
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-
*Li	77.31	-	58.51	66.17	25.94	-	80.41	-
Be	27.76	24.40	43.90	33.14	27.76	35.83	25.75	33.14
Rb	10097	11259	10626	9783	5544	7028	5803	7199
Y	11.41	3.76	47,32	32.96	15.17	1.99	42.47	-
Zr	37.09	39.67	4,03	25.21	19.21	7.85	11.93	28.35
Nb	64.79	52.74	23,18	32.79	32.45	11.59	17.17	24.16
Mo	45925	49828	5960	7610	4916	4786	4733	4741
Ru	-	-	-	-	-	-	-	-
Rh	-	-	-	-	-	-	-	-
Pd	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	-	-	1,91	-	-	-	17.98	7.87
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-
In	-	-	-	-	-	-	-	-
Sn	125.09	45.49	58.39	76.70	92.28	-	95.98	-

Sb	8549	4328	4692	27230	4626	3900	2997	5445
Te	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	37.95	39.40	32.15	28.92	16.00	20.85	19.07	25.91
La	22.10	16.37	421.15	146.99	154.70	136.71	89.12	59.29
Ce	12.09	6.09	593.22	105.42	139.02	123.72	77.69	54.04
Pr	5.14	4.14	78.25	35.22	38.74	38.54	24.47	15.85
Nd	22.73	22.52	288	147	157	167	127	70
Sm	4.49	3.47	38.32	21.35	26.53	21.05	19.83	9.50
Eu	0.91	1.36	8.69	5.62	6.90	5.21	5.57	2.39
Gd	5.56	3.84	33.15	19.32	19.91	16.77	17.91	9.08
Tb	0.68	0.55	3.95	2.44	1.76	1.64	2.02	1.02
Dy	4.25	4.27	14.31	9.92	6.96	5.77	9.06	3.98
Ho	0.94	1.12	2.51	1.94	1.08	1.13	1.25	0.66
Er	1.95	2.41	5.99	3.45	2.44	2.53	4.03	2.06
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	1.01	1.36	3.56	1.92	1.28	1.10	1.80	1.08
Lu	0.17	0.28	0.45	0.36	0.21	0.21	2.84	0.22
Hf	10.61	3.74	-	1.21	1.42	1.08	1.57	0.98
Ta	4.03	2.46	-	-	-	-	7.32	-
W	1000	912	261	260	272	142	314	163
Re	3.71	2.00	0.60	-	0.60	-	0.59	-
Os	-	-	-	-	-	-	-	-
Ir	-	-	-	-	-	-	-	-
Pt	15.93	8.25	16.01	3.39	2.42	5.77	5.23	136
Au	27.84	12.00	3.51	2.73	-	-	2.60	15.02
Tl	2.28	9.20	2.34	2.00	0.90	0.78	7.95	5.98
Bi	1.31	-	1.10	-	10.40	-	18.94	15.89
Th	1.50	2.50	6.49	2.51	1.79	1.71	1.82	3.35
U	1302	766	250	138	72	38	107	160

* концентрации элементов представлены в нг/л

Для детального анализа динамики выщелачивания с интервалом обработки через 2 недели были выбраны: Σ кат., Al, Be, Rb, Zr, Mo, La, W, Pt, U (рис. 19). Выщелачивание *основных катионов* было максимальным в 1 неделю в кислой среде, к 3 неделе в нейтральной. Содержание Al в 1 неделю эксперимента было максимальным в обоих пробах. В нейтральной среде после 3 недели содержание Al стало возрастать, в кислой плавно снижалось до 5 недели, а затем появилась тенденция к увеличению. Динамика выщелачивания Be сходна в обоих пробах: максимальное количество бериллия выщелачивалось к 3 неделе, затем произошло плавное снижение, практически достигнув первоначальных значений. Для Al и Be характерна

обратная корреляция ($r=0.82$ – в нейтральной среде, $r=0.88$ в кислой среде). Распределение Mo носит однородный характер вне зависимости от кислотности вод. Поведение Mo в водах носит неоднородный характер и определяется анионогенными свойствами, поэтому его высокие концентрации могут появляться в водах независимо от кислотности воды. Максимальные концентрации молибдена отмечены в 1 неделю, к 3 неделе произошло снижение концентрации, которое продолжилось к 7 неделе.



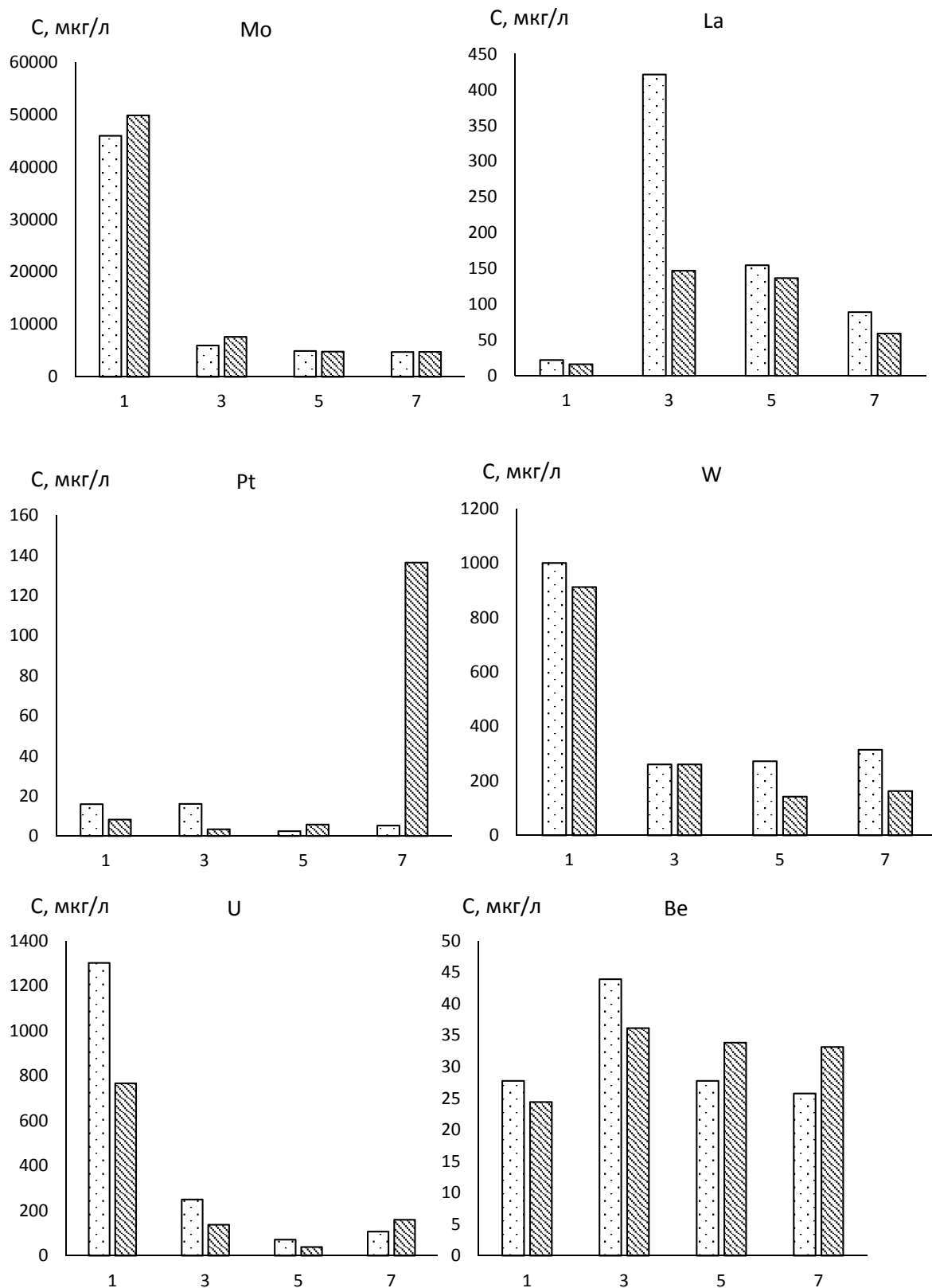




Рис. 19. Распределение содержания элементов при взаимодействии с фойяитом  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки

Максимальный разброс содержаний в пробах характерен для *Rb*, *Pt*, *La*, *U*, что скорее всего свидетельствует о разнообразии их форм в породах. Выщелачивание *Rb*, как в нейтральной, так и в кислой среде было неравномерным с течением времени. Высокая подвижность *La* в пробах отмечена на 3 неделю обработки, вне зависимости от кислотности раствора. Выщелачивание *W* и *U* носит неоднородный характер: повышенная миграционная активность элементов прослеживается в 1 неделю обработки и возобновляется к 7 неделе. Процесс перехода *Pt* в раствор показывает разницу в реакционной способности в зависимости от условий среды: миграционная активность *Pt* была максимальной в нейтральной среде в 1 неделю, в кислой среде к 7 неделе.

Уртит – щелочной тип пород, встречающийся в районе Ловозерских массивов. Выщелачивание в кислой среде большой группы элементов, таких как Na, K, Mn, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sb, La, Ce, Pr, Nd, W, Pt произошло после 1 недельной обработки (табл. 28). К 3 неделе отмечено усиление подвижности Al, S, Ga, Re, Tl, U, к 5 неделе Be. В последнюю неделю обработки увеличилась подвижность щелочноземельных элементов Mg, Ca, Cs, а также Rb, Si, Er, Th. В кислой среде в целом наблюдается повышение и усиление подвижности элементов, в особенности редких земель, которые являются основными элементами, характерными для данного типа пород и, обладая хорошей подвижностью свободно переходят в воду (по А.И. Перельману, 1989). В нейтральной среде после 1 недели обработки отмечено усиление миграционной активности V, As, Au, W, к 7 неделе Tl.

Таблица 28. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с уртитом

Элемент	1 неделя		3 неделя		5 неделя		7 неделя	
	1	2	1	2	1	2	1	2
B	2,58	12,67	-	3,44	-	2,15	2,50	3,29
Na	22476	22691	8986	8904	6342	7238	8643	7038
Mg	241	235	212	271	154	172	86	249
Al	727	707	385	453	445	262	497	249
Si	2786	2868	2069	2538	1687	2366	2126	2721

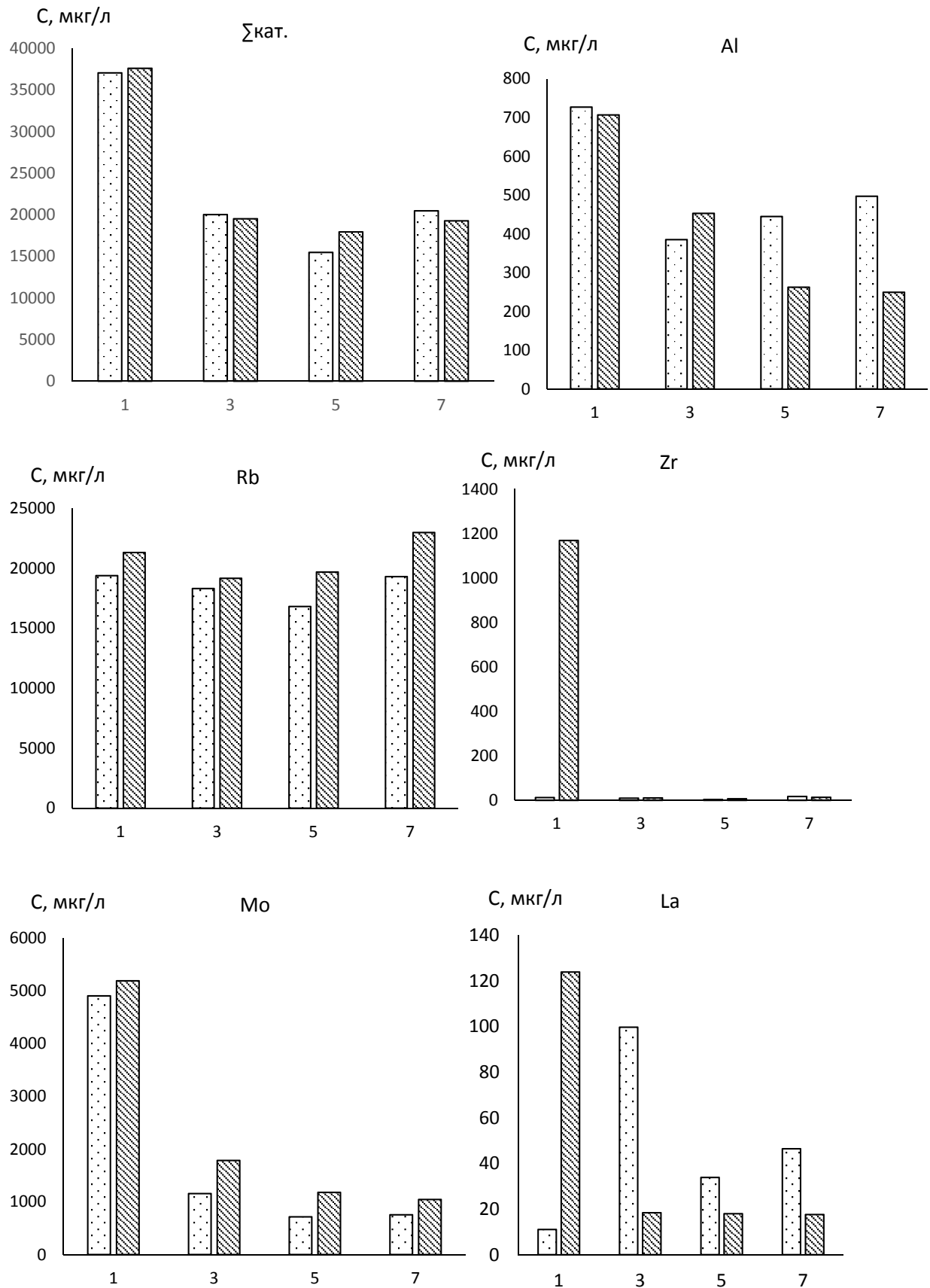
P	-	-	34,2	-	-	-	-	-
S	609	185	393	483	230	42	2711	174
K	12530	12844	8523	8319	6849	7956	9063	8478
Ca	1794	1818	2298	2016	2119	2561	2677	3500
Sc	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	47,85	-	-	-	-	-	-
V	1,15	0,91	0,44	0,34	0,37	0,16	0,62	0,38
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	1,75	11,20	2,89	3,46	1,55	5,04	2,21	6,09
Fe	8,01		11,09		19,60	13,76	31,80	19,74
Co	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0,04	-	15,00	-	-	-	4,60	-
Zn	-	-	49,72	-	-	-	1,63	-
Ga	0,86	0,84	0,37	0,42	0,32	0,32	0,39	0,34
Ge	-	-	-	-	-	-	-	-
As	1,29	1,09	0,58	0,58	0,41	0,24	0,44	0,22
Se	-	-	-	-	-	-	-	-
Br	-	-	-	-	-	-	-	-
Sr	25,58	65,80	34,91	34,03	34,25	50,55	36,52	62,33
Ba	0,74	12,88	2,99	-	0,38	-	0,73	-
Hg	-	-	-	-	-	-	0,02	-
Pb	0,03	-	0,39	-	0,05	-	0,19	-
*Li	4398	4254	1537	862	953	452	994	323
Be	8,26	9,61	7,59	5,57	6,25	10,28	11,62	5,57
Rb	19377	21306	18306	19153	16807	19674	19296	22968
Y	2,64	3,80	13,33	4,02	4,01	1,08	6,75	4,93
Zr	12,89	1168,99	10,04	11,20	3,92	7,46	17,76	14,00
Nb	64,14	949,61	19,57	17,02	9,38	5,89	16,98	5,28
Mo	4906	5191	1157	1784	715	1178	755	1044
Ru	-	-	-	-	-	-	-	-
Rh	-	-	-	-	-	-	-	-
Pd	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	-	-	-	-	-	-	22,95	-
Cd	-	-	-	-	-	-	32,37	-
In	-	-	-	-	-	-	-	-
Sn	381,19	0,60	91,49	-	46,89	-	138,09	-
Sb	4953	5154	58239	3746	3100	2528	5843	4388
Te	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	45,08	48,14	58,31	61,62	57,32	74,02	72,31	88,06
La	11,03	123,89	99,67	18,38	33,87	17,98	46,41	17,58
Ce	14,34	49,70	128,12	20,26	38,33	13,95	44,82	20,70
Pr	0,90	1,88	14,93	2,83	4,62	2,74	5,28	3,07
Nd	3,75	5,30	36,18	7,49	17,24	8,56	18,07	13,07
Sm	-	-	9,56	1,43	1,74	1,34	4,98	1,75
Eu	-	-	1,48	-	-	-	-	-
Gd	-	0,81	6,78	3,59	2,21	1,39	4,15	2,20
Tb	-	-	0,82	-	0,42	-	0,58	0,29

Dy	0,75	0,75	3,50	-	0,96	0,53	0,96	1,40
Ho	-	0,22	0,51	0,23	0,24	0,14	0,36	0,36
Er	0,45	0,67	1,46	0,33	0,59	0,51	0,90	0,97
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	-	1,89	0,92	-	0,31	0,00	0,40	-
Lu	-	0,29	-	-	-	-	0,43	-
Hf	3,40	15,85	-	0,80	1,16	1,08	1,08	0,87
Ta	2,19	55,47	-	-	-	-	3,15	-
W	1724	1677	391	274	266	174	361	174
Re	1,29	1,30	0,41	0,52	-	0,52	-	0,41
Os	-	-	-	-	-	-	-	-
Ir	-	-	-	-	-	-	-	-
Pt	5,83	5,98	14,96	1,24	1,68	1,13	4,91	3,80
Au	17,46	13,88	4,19	2,44	1,56	-	4,13	-
Tl	10,62	2,86	3,63	5,90	2,89	4,23	22,00	8,60
Bi	0,84	-	2,21	-	5,78	-	26,74	3,18
Th	1,16	2,46	1,55	0,00	0,79	1,25	1,81	11,52
U	1508	749	227	629	99,7	68,4	106	243

* концентрации элементов представлены в нг/л

Динамика выщелачивания была подробно рассмотрена на примере 9 элементов Σ кат, Al, Rb, Zr, Mo, La, W, Pt, U (рис. 19). Интенсивность миграции *основных катионов* отмечена в 1 неделю обработки, как в кислой, так и в нейтральной среде. Выщелачивание *Rb*, как в нейтральной, так и в кислой среде было неравномерным: в нейтральной среде максимальная подвижность отмечена к 1 неделе, в кислой – на последнюю неделю. Миграционная активность *Al* была максимальной в 1 неделю обработки в обеих пробах, после 3 недели в кислой среде отмечено снижение подвижности элемента. Быстрое выщелачивание *Zr* в кислой среде отмечено после 1 недели обработки, в нейтральной среде закономерных тенденций не выявлено. Выщелачивание *W* и *Mo* носит однородный характер: активное выщелачивание отмечено как в нейтральной, так и в кислой среде спустя недельную обработку. Высокая подвижность *La* в кислой среде к 1 неделе обработки, в нейтральной среде отмечена на 3 неделю обработки. Кислая среда ограничивает миграцию *Pt*, нейтральная, напротив, способствует

выщелачиванию к 3 неделе. Максимальная подвижность U отмечена как в нейтральной, так и в кислой среде.



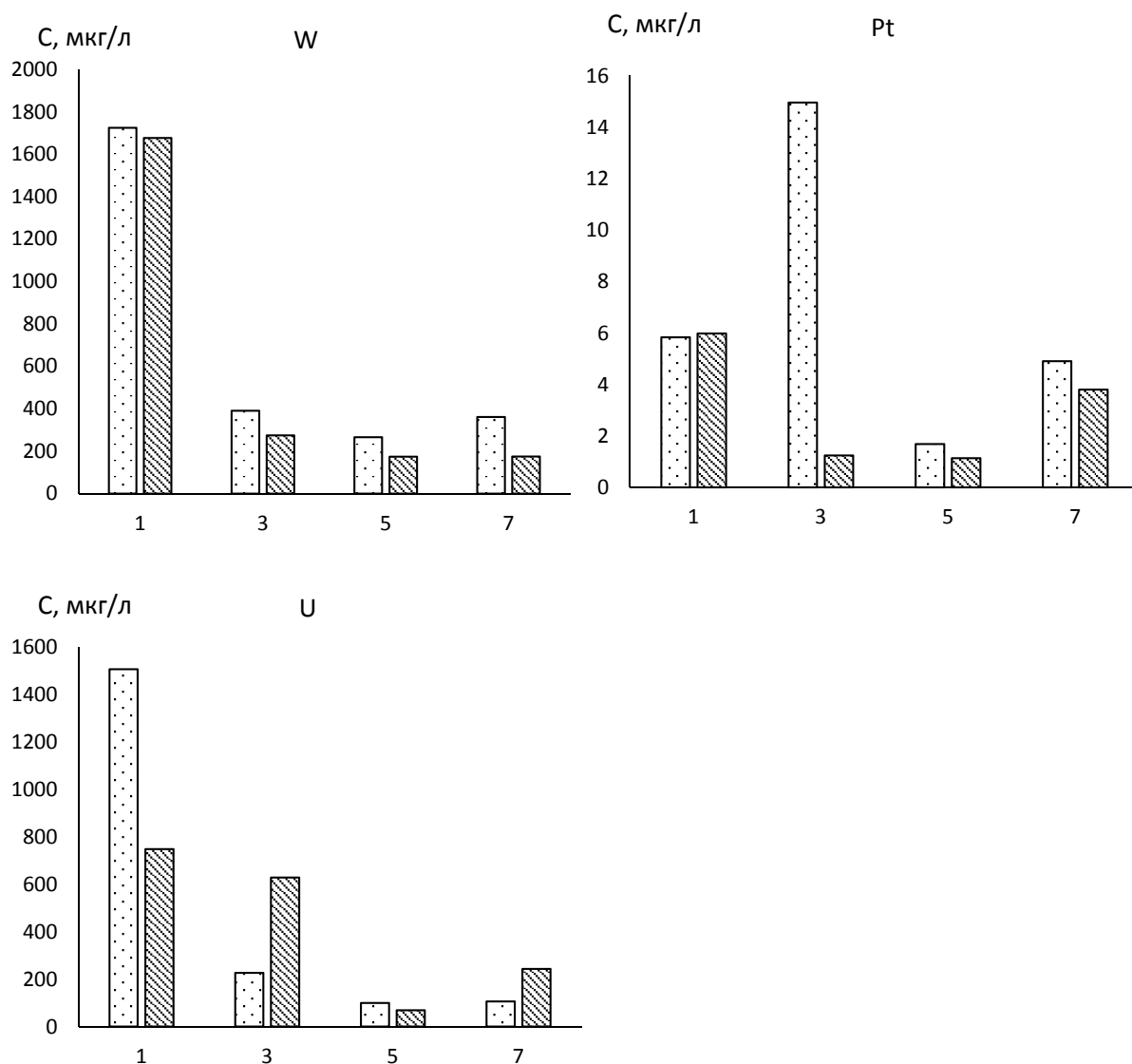


Рис. 20. Распределение содержания элементов при взаимодействии с уртитом в нейтральной, в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки

Териберские граниты – кислый тип пород, встречающийся в северо-восточной части региона. В нейтральной и кислой средах отмечены различия в поведении элементов (табл. 29). Активное выщелачивание элементов Si, K, Ca, Mn, Sr, Rb, Cs, La, Er, Yb, W, Re, Pt в кислой среде произошло после 1 недели эксперимента. К 3 неделе усилилась подвижность Sb, к 5 Na, Tl, к 7 Mo. После 1 недели обработки в нейтральной среде отмечено усиление миграционной активности Ga, Ba, Li, Mo, Ho, Lu, W, Au, U. Увеличение содержания редкоземельных элементов Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy отмечено к 3 неделе обработки, Sb на 5 неделю, Al, V, Cs на 7 неделю. Такие различия

скорее всего связаны с особенностями поведения элементов в разных условиях среды.

Таблица 29. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с териберскими гранитами

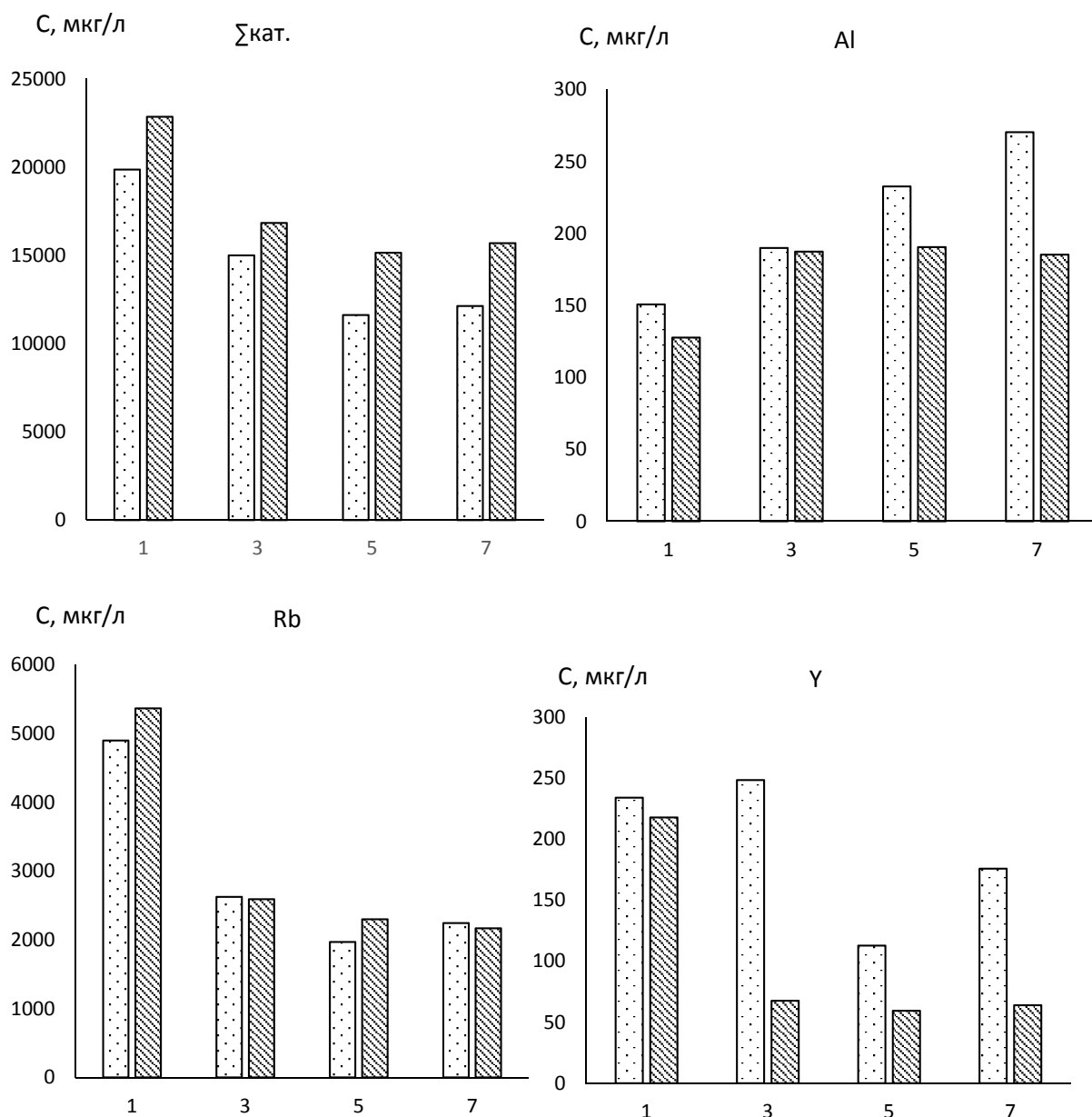
Элемент	1 неделя		3 неделя		5 неделя		7 неделя	
	1	2	1	2	1	2	1	2
B	3,99	14,42	-	1,77	-	0,93	-	3,79
Na	1338	1169	751	489	491	558	2181	593
Mg	1066	1130	541	561	373	415	219	366
Al	151	128	190	187	233	190	270	185
Si	2530	2601	1398	1461	1137	1213	1312	1298
P	-	-	-	-	-	-	-	-
S	336	-	253	249	191	-	1811	83
K	2324	2489	1193	993	667	788	1009	777
Ca	15125	18052	12505	14785	10084	13375	8719	13951
Sc	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-	-	1,16
V	0,56	0,43	0,41	0,38	0,48	0,30	0,59	0,36
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	27,79	45,75	23,08	37,91	12,71	34,39	11,83	39,52
Fe	-	-	6,08	-	20,70	9,27	29,45	42,44
Co	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	0,49	-	-	-	2,80	-
Zn	-	-	-	63,90	-	-	6,46	-
Ga	0,36	0,30	0,29	0,24	0,25	0,20	0,24	0,18
Ge	-	-	-	-	-	-	-	-
As	-	-	-	-	-	-	-	-
Se	-	-	-	-	-	-	-	-
Br	-	-	-	-	-	-	-	-
Sr	31,74	35,86	21,64	22,73	15,61	19,85	15,27	20,51
Ba	4,97	3,37	3,16	0,82	2,31	-	3,66	0,98
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	0,15	-
*Li	400	337	166	86,70	147	75,85	230	81,95
Be	-	-	-	-	-	-	-	-
Rb	4897	5365	2625	2591	1968	2298	2243	2167
Y	234	218	248	67,61	113	59,28	176	63,87
Zr	22,02	5,16	-	-	-	-	-	8,07
Nb	7,14	-	-	-	-	-	6,76	-
Mo	3746	3173	967	1321	551	1098	602	1413
Ru	-	-	-	-	-	-	-	-
Rh	-	-	-	-	-	-	-	-
Pd	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	-	-	5,95	-	-	-	94,34	-
Cd	-	-	-	-	-	-	27,37	-

In	-	-	-	-	-	-	-	-
Sn	132	54,80	52,08	-	53,28	-	101	-
Sb	3056	2730	3215	4141	4391	4202	2938	3854
Te	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	5,21	5,69	2,33	3,62	1,52	2,97	5,96	3,28
La	24,31	24,58	469	166	481	184	249	105
Ce	2,92	-	377	132	474	167	232	114
Pr	9,19	9,07	118	39,19	123	48,42	67,13	26,72
Nd	51,53	48,21	501	154	473	181	284	115
Sm	13,38	10,90	79,08	23,89	69,42	27,24	48,80	16,07
Eu	1,81	1,27	8,46	2,52	6,63	2,89	5,89	1,92
Gd	19,47	18,44	70,43	21,35	50,50	24,46	44,64	17,27
Tb	4,06	3,30	8,77	2,58	6,62	2,87	5,72	2,03
Dy	25,92	25,32	37,97	11,98	24,78	11,22	23,97	10,15
Ho	6,08	5,71	5,90	1,81	3,50	1,66	4,14	1,43
Er	12,99	14,30	10,39	4,14	6,28	3,05	8,42	3,68
Tm	1,02	1,23	1,16	-	-	-	-	-
Yb	5,81	5,87	5,85	1,80	2,43	1,76	3,28	1,70
Lu	0,96	0,79	0,66	0,28	0,55	0,23	0,66	0,27
Hf	1,35	-	-	-	-	-	-	-
Ta	-	-	-	-	-	-	-	-
W	223	131	129	24,37	113	-	187	25,40
Re	0,91	1,61	1,27	-	-	-	1,74	0,52
Os	-	-	-	-	-	-	-	-
Ir	-	-	-	-	-	-	-	-
Pt	6,97	9,58	13,96	2,53	3,39	2,96	5,83	3,07
Au	24,39	10,70	3,12	2,37	2,83	1,75	3,96	3,64
Tl	17,21	13,30	7,71	7,56	6,22	14,19	48,26	11,17
Bi	-	-	0,60	-	7,11	-	11,35	39,36
Th	-	-	2,49	1,54	1,50	0,86	2,21	1,17
U	6176	3217	1168	980	682	491	516	456

* концентрации элементов представлены в нг/л

Такие элементы, как Σ кат, Al, Rb, Y, Mo, La, Tl, Pt, U выбраны для выявления миграционных особенностей в зависимости от кислотности вод (рис. 21). Динамика выщелачивания основных катионов в кислой и нейтральной среде отмечена в 1 неделю, причем в кислой среде более интенсивно. Интенсивность миграции Rb, Mo и U в нейтральной и кислой среде была максимальной в 1 неделю эксперимента. Выщелачивание Al в нейтральной среде произошло к 5 неделе, в кислой к 7 неделе. Высокая миграционная мобильность Y отмечена в кислой среде на 1 неделю, в нейтральной среде к 3 неделе. Выщелачивание La в нейтральной и кислой

среде произошло на 5 неделю обработки. Кислая среда и геохимические особенности гранитов ограничивают миграцию *La*, *Tl*, *Pt*. Нейтральная, наоборот, способствует усилению подвижности элементов: максимальное выщелачивание *Pt* отмечено к 3 неделе, *La* к 5 неделе, *Pt* к 7 неделе.



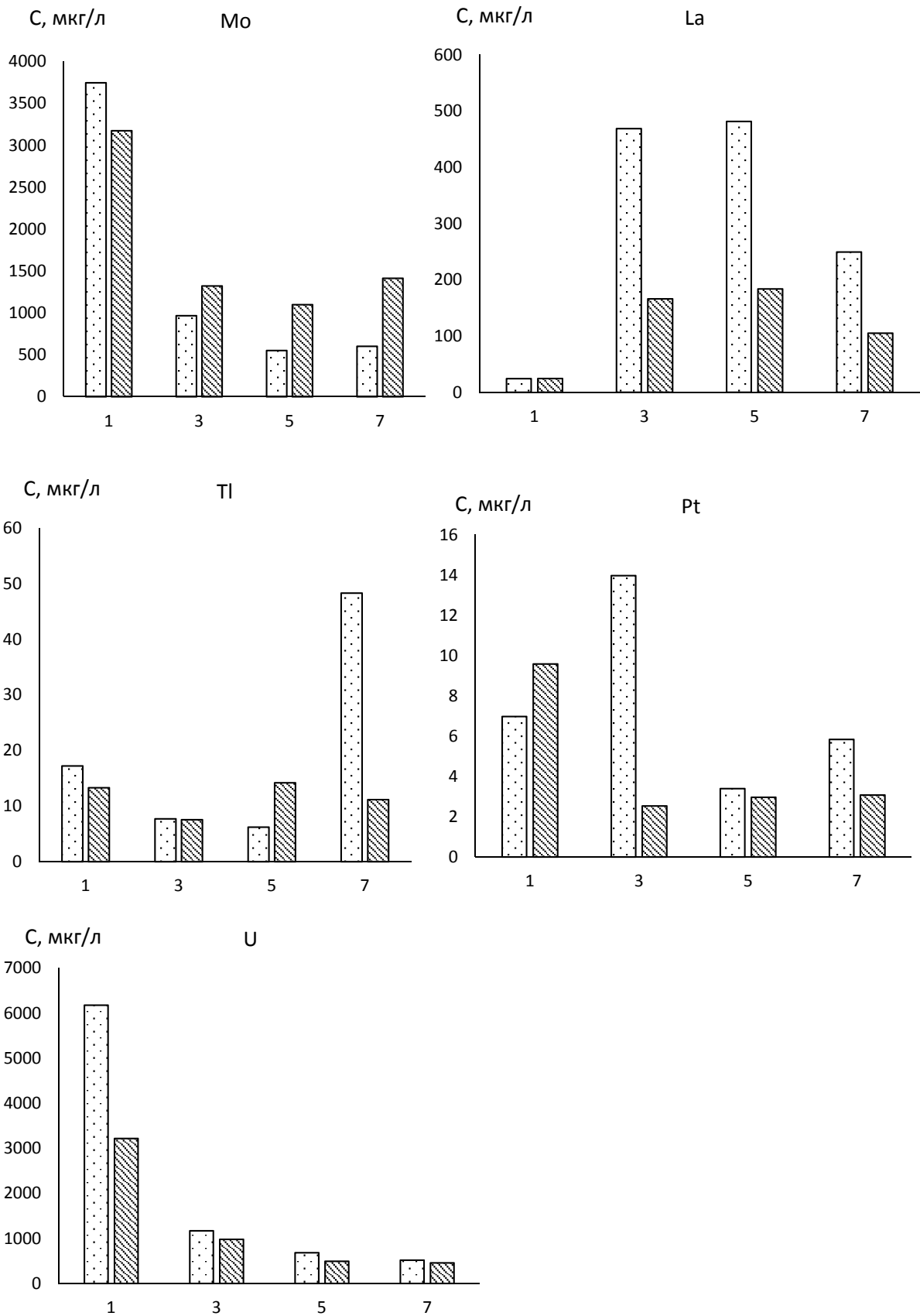




Рис. 21. Распределение содержания элементов при взаимодействии с териберскими гранитами  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки

Серебрянские граниты – кислый тип пород, которые были отобраны в районе Ловозерского лопаритового месторождения, что непосредственно сказалось на обогащении вод элементами (табл. 30). Максимальная миграционная активность элементов Na, Mg, Si, K, V, Sr, Rb, Sb, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, W, Tl отмечена в кислой среде после 1 недели обработки. К 3 неделе усилилась подвижность Cs, на 5 неделю Mo, Tl, к 7 неделе Mn, Pt, Au. После 1 недели обработки в нейтральной среде отмечено усиление подвижности Ga, Ba, Li, W, Au, U. После 5 недели увеличилась миграция Al, к 7 неделе - S. Эти различия в первую очередь обусловлены особенностями пород.

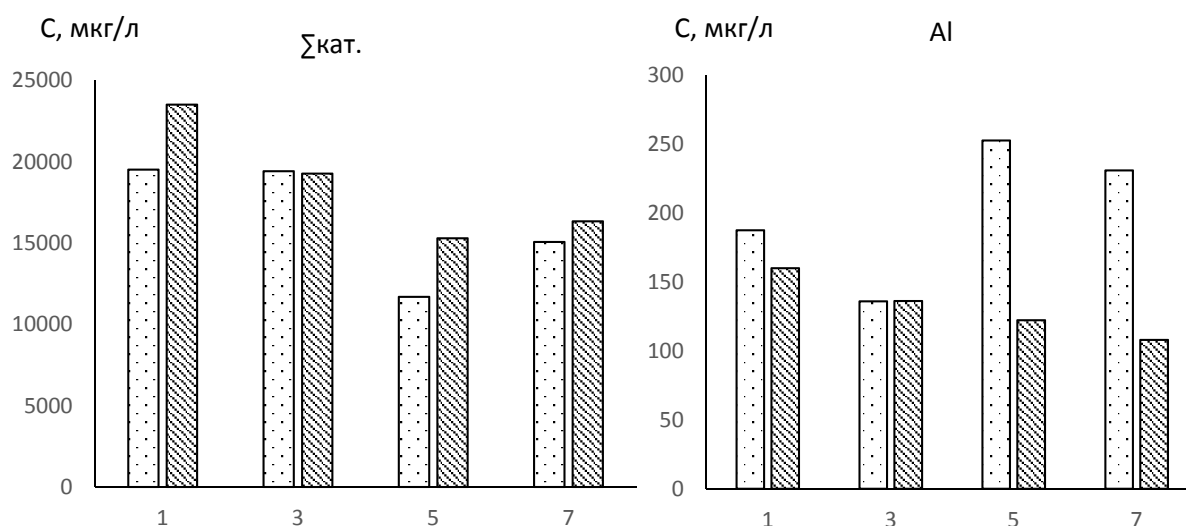
Таблица 30. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с серебрянскими гранитами

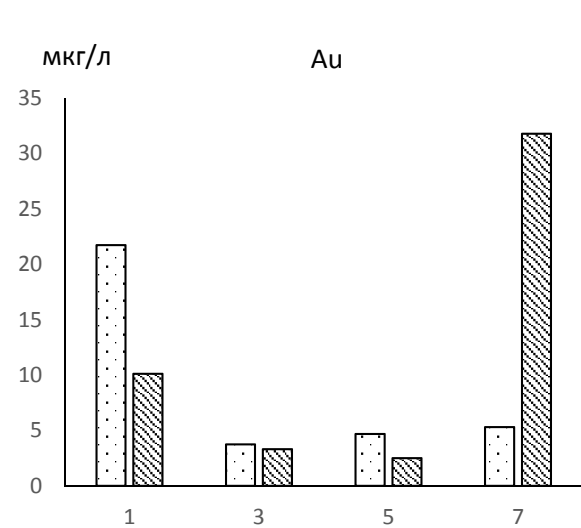
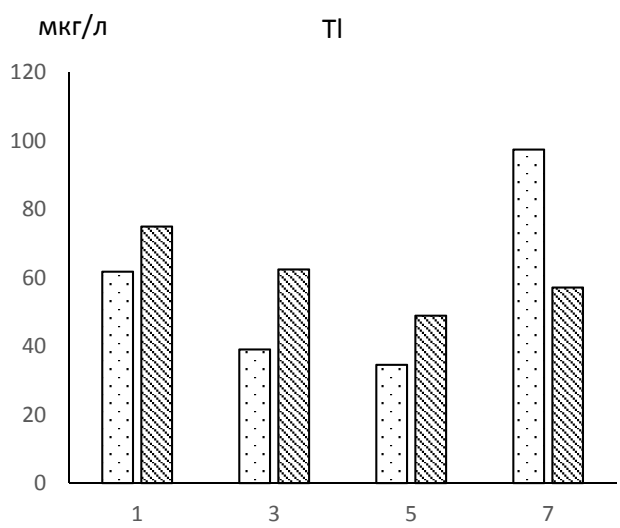
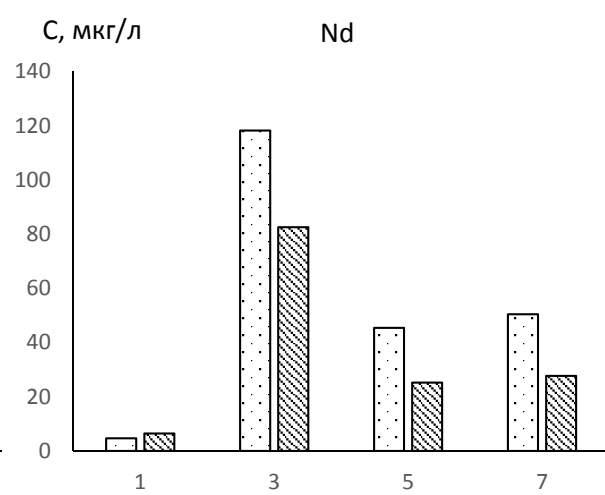
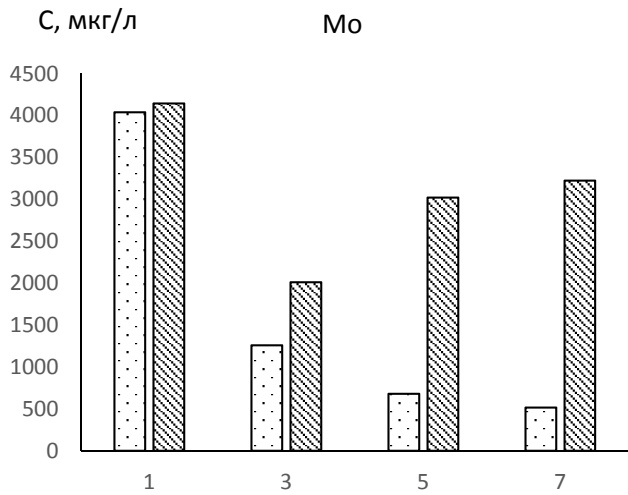
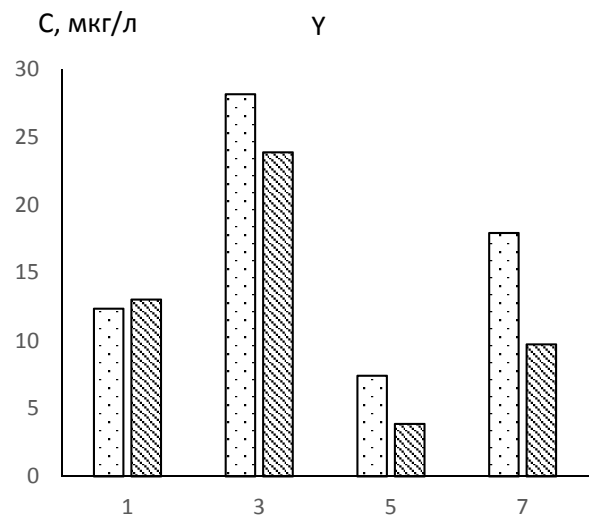
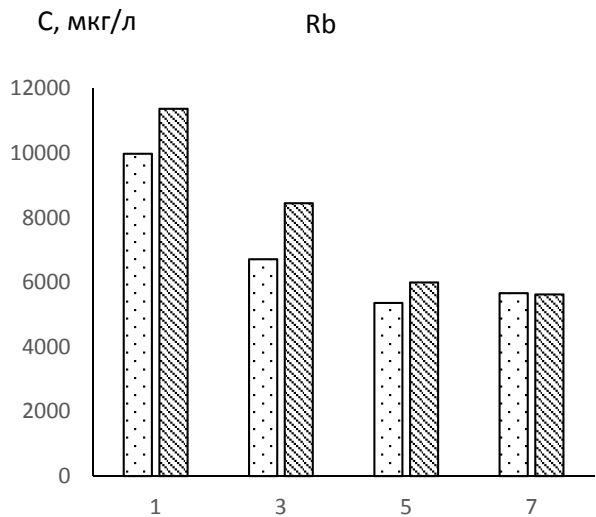
Элемент	1 неделя		3 неделя		5 неделя		7 неделя	
	1	2	1	2	1	2	1	2
B	-	5,85	-	4,85	-	1,00	-	3,12
Na	1178	1413	871	855	481	468	2679	795
Mg	776	923	508	470	288	290	185	348
Al	188	160	136	136	253	122	231	108
Si	2180	2337	1289	1432	1027	1176	1375	1307
P	-	-	21,7	-	-	-	-	-
S	258	-	285	205	203	-	2091	185
K	2769	3009	1690	1616	753	915	1388	1133
Ca	14796	18170	16348	16336	10175	13622	10816	14068
Sc	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-
V	0,92	0,94	0,76	0,45	0,85	0,29	0,88	0,38
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	44,90	78,96	72,32	184,70	30,88	174	48,51	189
Fe			6,47		18,70	11,86	32,60	20,22
Co	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	-	0,15	-	5,45	-
Zn	-	-	-	-	-	-	7,47	-
Ga	0,37	0,31	0,17	0,14	0,20	0,13	0,19	0,13
Ge	-	-	-	-	-	-	-	-
As	-	-	0,08	-	-	-	-	-
Se	-	-	-	-	-	-	-	-
Br	-	-	-	-	-	-	-	-
Sr	27,15	36,02	25,54	27,38	14,34	18,99	15,58	20,22
Ba	4,75	2,70	3,81	1,34	2,01	0,18	3,47	3,20

Hg	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	0,36	-	-	-	0,51	-
*Li	3746	3622	1152	926	568	497	688	484
Be	-	-	-	-	-	-	-	-
Rb	9980	11371	6715	8450	5362	5997	5666	5627
Y	12,34	13,01	28,13	23,86	7,40	3,85	17,92	9,71
Zr	-	5,10	-	6,11	-	1,91	18,32	9,81
Nb	-	-	-	-	-	-	7,60	-
Mo	4038	4144	1259	2010	680	3020	516	3223
Ru	-	-	-	-	-	-	-	-
Rh	-	-	-	-	-	-	-	-
Pd	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	-	-	3,04	-	-	-	19,41	69,40
Cd	11,51	-	13,99	-	-	-	29,39	-
In	-	-	-	-	-	-	-	-
Sn	57,18	161	85,78	-	29,22	-	121	-
Sb	3370	3726	4561	3780	4001	3845	3655	5138
Te	-	-	-	-	-	-	-	-
Cs	4,17	3,65	2,88	6,53	3,73	4,91	5,85	5,89
La	-	-	139	89,55	48,85	27,55	52,75	31,67
Ce	-	-	176	111	68,95	40,17	65,86	41,18
Pr	0,17	0,85	31,10	19,76	12,31	7,67	11,96	7,04
Nd	4,64	6,44	118	82,49	45,36	25,19	50,38	27,65
Sm	1,34	-	15,32	13,27	7,02	4,22	8,96	6,42
Eu	-	-	2,20	1,35	-	-	0,83	-
Gd	1,51	1,87	16,03	10,71	5,26	3,33	6,72	4,90
Tb	0,34	0,35	1,55	0,90	0,47	0,32	0,90	0,57
Dy	2,47	2,85	6,09	5,17	1,83	1,82	3,48	2,09
Ho	0,48	0,66	0,93	1,15	0,13	0,23	0,55	0,57
Er	0,86	0,85	2,18	2,68	0,75	0,56	1,26	0,91
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	0,66	0,80	1,72	1,08	0,48	-	0,46	0,31
Lu	-	-	-	-	-	-	-	-
Hf	-	-	-	-	-	-	-	-
Ta	-	-	-	-	-	-	-	-
W	261	205	117	40,60	-	53,70	203	102
Re	-	1,04	-	0,41	0,52	1,13	1,04	0,84
Os	-	-	-	-	-	-	-	-
Ir	-	-	-	-	-	-	-	-
Pt	3,40	4,47	14,39	1,60	4,45	4,70	4,15	179
Au	21,72	10,11	3,74	3,31	4,68	2,50	5,30	31,77
Tl	61,77	74,96	39,03	62,43	34,54	48,93	97,49	57,14
Bi	0,24	-	0,06	-	2,23	-	27,73	32,99
Th	-	-	4,97	2,91	2,89	2,56	2,42	2,81
U	4073	3219	1313	877	536	346	524	317

* концентрации элементов представлены в нг/л

Такие элементы, как $\Sigma_{\text{кат}}$, Al, Rb, Y, Mo, Nd, Tl, Au, U выбраны для выявления особенностей миграционной активности в разных условиях среды (рис. 22). Повышенная миграционная активность основных катионов отмечена в 1 неделю обработки независимо от кислотности среды, однако в кислой среде она была выше. Интенсивность миграции Rb, Mo и U в нейтральной и кислой среде была максимальной в 1 неделю эксперимента. Выщелачивание Y и Nd носит одинаковый характер: в нейтральной и кислой среде - к 3 неделе произошло усиление миграционной активности элементов. Быстрое выщелачивание Al в кислой среде отмечено после 1 недели обработки, в нейтральной среде на 5 неделю. Выщелачивание Tl в кислой среде было максимальным в 1 неделю обработки, в нейтральной к 7 неделе. Динамика выщелачивания Pt в зависимости от кислотности носит неоднородный характер: в нейтральной среде к 3 неделе увеличилась подвижность элемента, в кислой среде активное выщелачивание произошло после 7 недели обработки.





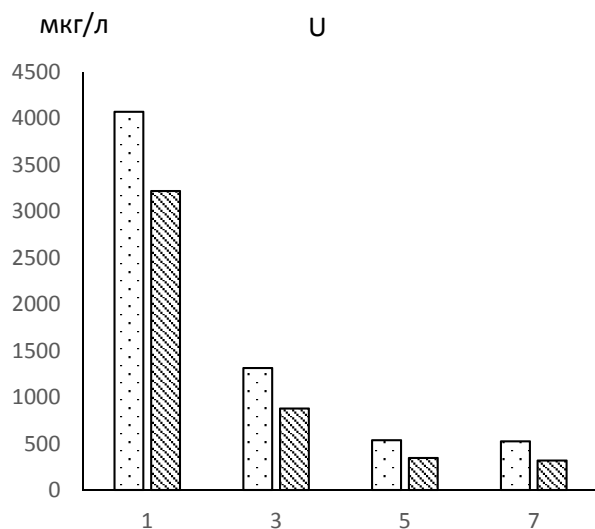




Рис. 22. Распределение содержания элементов при взаимодействии с серебрянскими гранитами  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки

5.3 Анализ водной миграции элементов.

Для исследования выщелачивания элементов было рассмотрено соотношение w/r , где w – содержание элемента в воде (%), r – содержание элемента в горной породе (%). Расчет коэффициентов водной миграции элементов осуществлялся по отношению к кларкам пород, что позволило, выделить универсальные закономерности распределения элементов в нейтральной и кислой среде (табл. 31, 32).

В целом при взаимодействии с фойяитом в нейтральной среде отмечены самые высокие коэффициенты миграции Sb, Bi, Mo, S. Высокая подвижность S отмечена при взаимодействии с териберскими и серебрянскими гранитами. Высокой миграционной способностью при взаимодействии с фойяитом характеризуются такие элементы, как Tl, W, Rb. Относительно невысокая подвижность отмечена для Ca и S.

Низкая миграционная способность редкоземельных элементов в целом для всех пород объясняется невысоким содержанием элементов в породе, по сравнению с типоморфными элементами. Замедление подвижности Al, Fe, Mn, Zr, U, Sr при взаимодействии с фойяитом и серебрянскими гранитами скорее всего обусловлена физико-химическими свойствами элементов.

В кислой среде в целом произошло усиление миграционных свойств элементов. При взаимодействии с фойяитом в разы увеличилась подвижность K, Nb, Sn, Ce, Zr, Sm. Реакция с уртитом показала, что кислая среда способствует усилению миграции щелочных K, Ca, Na и редкоземельных элементов.

Взаимодействие кислого раствора с серебрянскими гранитами обусловило увеличение миграции Ca, Mo. Ухудшение миграционных свойств элементов произошло в случае с S больше, чем в 30 раз и Al, что скорее всего связано с физико-химическими свойствами элементов, а также особенностями геологической структуры. При реакции с териберскими гранитами отмечено незначительное снижение миграции Ca и S почти в 10 раз.

Выводы:

Экспериментальными данными доказано, что выщелачивание в кислой среде происходит быстрее, по сравнению с нейтральной средой. В кислой среде при взаимодействии с фойяитом и уртитом отмечено максимальное содержание щелочных, щелочноземельных и редкоземельных элементов. При взаимодействии с териберскими и серебрянскими гранитами также отмечены сходства в распределении элементов: усиление подвижности щелочных и щелочноземельных в нейтральной, редкоземельных элементов в кислой среде.

Таблица 31. Интенсивность миграции элементов в водной среде, где w – содержание элемента в воде (%), r - содержание элемента в породе (%)

w/r/породы	Интенсивность миграции	фойяит	уртит	серебрянские граниты	териберские граниты
0.01-1.0	низкая	Zr(0.01),Nb(0.03),Fe(0.08),Th(0.11), Al(0.17),Ce(0.25),Yb(0.43),Mn(0.48), La(0.57),Ho(0.60),Pr(0.64),Er(0.74), Dy(0.77),Sm(0.82),Tb(0.83),Eu(0.86), Y(0.86),Nd(0.87),Gd(0.98)	-	Sr(0.01),U(0.02),Tl(0.03),W(0.03), Mo(0.06),Fe(0.07),Al(0.30)	-
1-10	средняя	Be(3.5),K(4.3),Lu(5.0) Na(5.4),Li(6.0)	Ca(2.2),K(3.9),Na(5.3)	Sb(2.0),K(2.7),Mn(4.6),Na(4.6),	K(2.7),Sb(2.7),Na(4.5),
10-100	сильная	Cs(12),Ca(13),Sn(27),Rb(62)	-	Ca(28.4)	Ca(47.3)
>100	очень сильная	Tl(218),W(138),S(537), Mo(676),Bi(965),Sb(5225)	S(39)	S(371)	S(292)

Таблица 32. Интенсивность миграции элементов в кислой среде, где w – содержание элемента в воде (%), r - содержание элемента в породе (%)

w/r/породы	Интенсивность миграции	фойяит	уртит	серебрянские граниты	териберские граниты
0.01-1.0	низкая	Y(0.01),Yb(0.01),Cs(0.06),Eu(0.06), Ho(0.09),La(0.10),Tb(0.11),Er(0.17), Mg(0.27),S(0.32),Ca(0.52),Lu(0.40), Mn(0.83),Sb(0.53)	Zr(0.01),Ga(0.01),Eu(0.02),Sn(0.02), Nd(0.09),Mo(0.04),Cs(0.11),Gd(0.11), Cu(0.14),Ag(0.21),Ce(0.22),Sb(0.32)	W(0.02),Mo(0.18),Al(0.18)	U(0.02),Sr(0.01),Fe(0.09), Mo(0.13),Al(0.18),
1-10	средняя	Pt(1.1),Sm(1.5),Zr(1.8),Ce(2.3), Be(3.7),Sr(3.7),K(16),W(14)	-	-	-
10-100	сильная	Nd(17),Pr(19),Li(24),Sn(58),Re(66)	Si(95),Na(92),Mg(14)	S(12),Ca(68)	Mn(19),S(33),Ca(38)
>100	очень сильная	Nb(637),Si(801)	B(114),Al(126),K(435),	-	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Кольском Севере вследствие длительного функционирования медно-никелевых плавильных производств произошло антропогенное закисление и загрязнение вод металлами. Механизм закисления вод развивается при наличии двух условий: 1) повышенный уровень эмиссии кислотообразующих веществ на водосборы и 2) уязвимость территории по ландшафтным и геохимическим условиям. Несмотря на тенденцию к снижению содержания сульфатов в поверхностных водах в течение последних 20 лет, закисление вод сохраняется, что является следствием 50-летней нагрузки сульфатов на водосборы.

Увеличение содержания металлов в воде озер может быть обусловлено: 1) рассеиванием с дымовыми выбросами; 2) ускорением выноса металлов из почв при поступлении сильных кислот; 3) выщелачиванием элементов и связывание металлов органическим веществом, особенно в лесных и заболоченных водосборах.

Формирование химического состава вод обусловлено совокупностью природных и антропогенных процессов, происходящих на водосборе и в водоеме. На территории Кольского Севера выделено 7 районов, отличающихся преобладающим типом пород и характерными ландшафтами.

Региональные особенности формирования химического состава вод проявляются в преобладании Na и Cl под воздействием морских аэрозолей в зонах тундры и лесотундры (I и VII районы). Локальные особенности проявляются в снижении pH, буферной емкости вод (Alk) и как следствие увеличении поступления с водосбора слабых органических кислот (II, III и VI районы). Большая часть озер сохраняет буферные свойства вод, их расположение приурочено к породам, способным к нейтрализации кислотных выпадений.

Процессы закисления проявляются в разных районах вне зависимости от уровня аэротехногенного загрязнения. В I, IV и V районах доминируют

процессы антропогенного закисления. Для них характерно более высокое содержание в воде техногенных сульфатов, минимальные значения кислотонейтрализующей способности меньше критической отметки, а также цветность меньше 30^0 Pt-Co. Процессы природного подкисления вод активно развиваются в озерах, расположенных в II, III VI районах. Они выражаются в увеличении щелочности и кислотонейтрализующей способности, максимальные значений цветности и соответственно содержания органического вещества.

Анализ ландшафтных и геохимических особенностей, в совокупности с уровнем аэротехногенного загрязнения позволил выделить 12 антропогенно – закисленных, 10 природно-подкисленных и 75 нейтральных озер.

Сокращение эмиссии выпадения сульфатов не приводит к сходным реакциям во всех озерах: в ряде озер наблюдаются тенденции к восстановлению буферных свойств системы, в некоторых других гидрохимические показатели остаются неизменными; часто продолжает развиваться процесс закисления воды озер.

Несмотря на широкое использование термина «восстановление», он не характеризует те процессы, которые развиваются в водах суши Кольского Севера за последние 20 лет. Несмотря на значительное уменьшение выбросов в атмосферу окислов серы и металлов, прямой зависимости восстановления химического состава вод (точнее, возврата к прежнему природному состоянию) не происходит. Это особенно выражается в обеднении вод обменными основаниями, несмотря на снижение содержания сульфатов. Следует отметить, что наряду с локальным влиянием эмиссии кислотообразующих газов на Кольском Севере проявляется влияние трансграничных переносов загрязняющих веществ из индустриально развитой Европы в Арктику. Большую роль играет тенденция к увеличению слабых органических кислот (растворенного органического углерода), на фоне снижения потока сильных кислот.

Для Кольского Севера, как и в других регионах Европы и Северной Америке, доказано увеличение содержания в водах озер растворенного органического вещества за последние 20 лет. Два фактора могут контролировать указанный процесс: 1) снижение поступления сильных кислот и возврат к природным характеристикам, 2) влияние повышения температуры. Наряду с повышением содержаний органического вещества и биогенных элементов снижается цветность вод в многолетнем ряду наблюдений. Возможно, этот феномен может быть связан с изменением структуры органического вещества в направлении образования низкомолекулярных фракций.

Обогащение вод теми или иными элементами происходит вследствие антропогенного рассеивания и выщелачивания их кислотными осадками. В связи с этим озера, находящиеся в непосредственной близости от горно-металлургических предприятий, характеризуются повышенными содержаниями Cu, Ni, Se, Bi как результат пылевой эмиссии и кислотного выщелачивания осадками. Также воды обогащены такими элементами, как Sr, Cs, Li, Ba, B, Zn, Mn, Ag, La, Ce, Pr.

Антропогенно-закисленные озера тундрово-таежного региона характеризуются повышенными содержаниями Al, Fe и Mn вследствие увеличения площадей заболоченных территорий As, La, Bi, V, обусловленные антропогенной нагрузкой на водосборы. Озера, расположенные в заболоченных регионах, характеризуются более высокими содержаниями Al, Fe, Co, Zn, Mn, Cr вследствие усиления биогенной миграции элементов, которые взаимосвязаны с органическим веществом, а также P, Cd, U, Sb. Увеличение содержания редкоземельных элементов в природных водах обусловлено высокой миграционной способностью. В водах, приуроченных к гранито-гнейсовым породам (фоновые районы), концентрации микроэлементов минимальны, что связано с их меньшей подверженностью к кислотному выщелачиванию.

В воде озер, расположенных на лесных и заболоченных водосборах, большое значение имеет закисление вод, обусловленное увеличением содержания органических природных кислот на фоне снижения потока сильных минеральных кислот.

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.

В работе защищаются следующие основные положения:

1. В результате сокращения выпадения сульфатов за последние 20 лет процессы изменения химического состава природных вод 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. Влияние аэротехногенного источника загрязнения подтверждается повышенными концентрациями техногенных сульфатов в удаленных от металлургического производства районах.
2. Сопряженное влияние ландшафтных и геохимических условий, а также аэротехногенной нагрузки определяет распространение элементов в водах озер различных рудоносных районов. Выпадения на водосборы кислотных осадков определяют повышенные концентрации микроэлементов в природных водах. Гумусовые кислоты вовлекают элементы в транспортные потоки с водосборов. Вне зависимости от антропогенного или природного подкисления воды Кольского Севера при низких pH обогащены такими элементами как Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Ag, Pb, As, Sc, Cd, Sn, Sb.
3. Наибольшая интенсивность перехода элементов в раствор (по данным экспериментальных работ) характерна как в кислой, так и в нейтральной среде при взаимодействии с фойяитом, в меньшей степени с уртитом, а самое низкое - с териберскими гранитами в первые недели. В целом, выщелачивание в кислой среде происходит быстрее, по сравнению с нейтральной средой.

Список литературы

1. Акименко М.И., Когарко Л.Н., Н.В. Сорохтина Н.В., Кононкова Н.Н., Мамонтов В.П. Новое проявление щелочного магматизма на Кольском полуострове, Агпайтовая дайка в Кандалакшском районе // Доклады Академии наук. - 2014. Т 458. - № 2. - С.193-197.
2. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. - 444 с.
3. Алексеев В.А., Кочнова Л.Н., Бычкова Я.В., Кригман Л.В. Экспериментальное исследование извлечения нормируемых элементов водой из загрязненных пород. – 2001. № 12. – С. 1317-1342.
4. Анисимова Л.А., Ефимова Л.Е., Тананаев Н.И. Оценка гидроэкологического состояния водных объектов Хибинского полигона МГУ. Материалы международной научной конференции «Современные экологические проблемы Севера». Апатиты. - 2006. - Т.1. - С. 140-142.
5. Антонов А.А. О химическом составе подземных вод Хибинского щелочного массива. Бюлл. МОИП, т. 32(2). - 1964. - 231 с.
6. Атлас Мурманской области. Мурманск. - 1971. - 33 с.
7. Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Степанова И.Э. Гидроксиламин и гидразин в водных экосистемах. Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати». - 2007. - 128 с.
8. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем // Новосибирск: ГЕО, 2006. 169 с.
9. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Присекина Н.А.. Геохимическая оценка потенциальной опасности отвальных пород Ведугинского месторождения. // Геохимия. - 2010. - N 3. - с. 295-310
10. Бульон В.В. Имеет ли место естественное эвтрофирование озер? // Водные ресурсы. - 1998. - Т. 25. - № 6. - С. 759-764.
11. Веницианов Е.В., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в природных водах. М.: ИВП РАН, 1994. - С. 299-326.

- 12.Вернадский В.И. Избранные сочинения.- М.: изд-во АНССР, 1960. - т. IV, кн. вторая.
- 13.Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. - 261 с.
- 14.Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. (1990) Справочник по геохимии. М.: Недра, 480 с.
- 15.Гаськова О.Л., Бортникова С.Б. К вопросу о количественном определении нейтрализующего потенциала вмещающих пород // Геохимия. - 2007. - № 4. - С. 461–464.
- 16.Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита) масштаба 1:500000. Гл. ред. Ф.П.Митрофанов. Авторы - В.В.Балаганский, А.А.Басалаев, О.А.Беляев, В.И.Пожиленко, А.Т.Радченко, М.К.Радченко). - Апатиты, 1996. - 3 печ.л.
- 17.Герасимовский В.И., Волков В.П. и др. Геохимия Ловозёрского щелочного массива. М.: Наука, 1966. – 396 с.
- 18.Гидрографическая характеристика бассейнов рек Европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 102 с.
- 19.Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высш. шк., 1998.
- 20.Горбунов Г.И., Бельков И.В., Макиевский С.И.и др. Минеральные месторождения Кольского полуострова. Л.: Наука, 1981. - 272 с.
- 21.Гореева Н. М., Демидова Л. Н. Клизогуб Л. М. и др. Статистика в схемах и таблицах, 2007. - "Эксмо-Пресс". - 416 стр.
- 22.Граве М.К., Евзеров В.Я. и др. Рельеф и геологическое строение осадочного покрова Кольского полуострова, Сборн., «Наука», 1964
- 23.Даувальтер В.А. Формирование химического состава природных вод в зоне влияния горно-металлургического комбината «Североникель»: диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.36. – Апатиты, 2004. – 209 с. : ил. РГБ ОД

24. Даценко Ю. О статье В.В. Бульона "Имеет ли место естественное эвтрофирование озер" // Водные ресурсы. — 1998. — Т. 25, № 6. — С. 765–766.
25. Даценко Ю.С. «Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты» Москва: ГЕОС, 2007. - 252с.
26. Дину М.И. Влияние функциональных особенностей гумусовых веществ на формы нахождения металлов в природных водах: монография. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2012. - 168 с.
27. Добровольский В.В. Вещественный состав и морфология коры выветривания: Учебное пособие. 1964.
28. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2013 году. — г. Нижний Новгород: Индивидуальный предприниматель Кузнецов Никита Владимирович, 2014. — 152 с, ил. — 8 с.
29. Дорфман М.Д. Геохимические особенности процесса выветривания нефелиновых сиенитов Хибин. Изд-во АН СССР. М.-Л., 1964.
30. Заславская М.Б. Окисляемость воды. Органическое вещества в природных водах. Цветность воды. В кн. Экологический энциклопедический словарь.- М.: Издательский дом «Ноосфера», 1999.-С.437-438.
31. Иванов В.В., Экологическая геохимия элементов: Справочник: в 6 кн. / Под ред. Э.К. Буренкова. – М. Недра, 1994.
32. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я. Кислотные дожди. Л., Гидрометеоздат, 1989. - 269 с.
33. Каталог озер Мурманской области. Л.: Изд-во АН СССР, 1962. - 146 с.
34. Каталог озер Мурманской области. Л.: Изд-во АН СССР, 1962. - 212 с.
35. Комов В.Т., Лазарева В.И., Степанова И.К. Антропогенное загрязнение малых озер Севера европейской России // Биология внутр. Вод. – 1997. - №3. - С. 5-17

36. Красовская Т.М., Евсеев А.В. Рациональное природопользование на Кольском полуострове. М., МГУ, 1990.
37. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд-во Кольск. научн. центра АН СССР, 1989. - 96 с.
38. Лаврова М.А., Четвертичная геология Кольского полуострова, М.-Л., 1960.
39. Ланчикова О.Е., Каплин В.Т. Поступление органических и биогенных веществ из растительного покрова в природные воды. Гидрохим. материалы. Л.: 1970, том 53. - с. 139-144.
40. Левицкий В.И. Петрология и геохимия метасоматоза при формировании континентальной коры / В.И. Левицкий, Новосибирск, 2005. - 340 с.
41. Лозовик П.А. Устойчивость водных объектов к закислению в зависимости от их удельного водосбора на примере озер и рек бассейна р. Шуи (Онежской) // Водные ресурсы. - 2006. - № 2. - с. 188-194
42. Лукин А. А., Даувальтер В. А., Кашулин Н.А., Раткин Н.Е. Влияние аэротехногенного загрязнения на водосборный бассейн озер Субарктики и рыб. Экология, 1998. - № 2. - с. 109-115
43. Макарова Т.Д., Попов Я.П., Артоболевский В.И. Атмосферный воздух в условиях промышленного освоения Кольского Севера, 1996.
44. Медно-никелевые месторождения Печенги. Отв. ред. Н.П.Лаверов. - М.: ГЕОС, 1999. - 236 с.
45. Минеральные месторождения Кольского полуострова (Г.И.Горбунов, И.В.Бельков, С.И.Макиевский и др.) - Л.: Наука, 1981. - 272 с.
46. Моисеенко Т.И. Закисление вод и сопряженное поведение элементов химического состава вод // Геохимия. - 2005. - № 10. - С. 1120-1127.
47. Моисеенко Т.И. Оценка экологической опасности в условиях загрязнения вод металлами // Водные ресурсы. 1999. Т.26(2), 186-197.

- 48.Моисеенко Т.И. Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. М: Наука, 2003. - 276 с.
- 49.Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Каган Л.Я. Горные озера как индикаторы загрязнения воздуха // Там же. - 1997. - Т. 24. - № 5. - С. 600-608.
- 50.Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Гашкина Н.А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: Технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. - 261 с.
- 51.Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод в условиях изменения окружающей среды. Институт водных проблем РАН. - М.: Наука, 2010. - 268 с.
- 52.Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Сандимиров С.С. Принципы и методы исследования качества вод при аэротехногенном загрязнении водосборов // Водные ресурсы. - 2000. - Т.27. - № 1. - С. 91-99.
- 53.Моисеенко, Т.И. Феномен нарастания органических кислот в природных водах и их влияние на закисление вод / Т.И. Моисеенко, М.И. Дину // Доклады Академии наук. 2015. - Т. 460, № 5. - С. 574-578.
- 54.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.
- 55.Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. - 285 с.
- 56.Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Спб: Гидрометеиздат, 2001. – 444 с.
- 57.Никонов В.В., Лукина Н.В., Дером Д. и др. // Почвоведение. - 1993. - № 11. - С. 31.
- 58.Новые Хибинские апатитовые месторождения (Ред. Е.А.Каменев, Д.А.Минеев). - М.: Недра, 1982. - 182 с.
- 59.Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2009 г. М.: Росгидромет, 2010. - 177 с.

60. Озера различных ландшафтов Кольского полуострова. Л.: Наука, 1974. - 236 с.
61. Оноприенко М.Г. Вода питьевая и здоровье. Сочи, 2002. - 63 с.
62. Переверзев В.Н. Биохимия гумуса и азота почв Кольского полуострова. Л.: Наука. – 1987. - 306 с.
63. Перельман А.И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 154 с.
64. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. - 528 с.
65. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Изд-во ВНИРО, 1999. - 304 с.
66. Пономарева В.В., Этингер А.И. К характеристике природы веществ, растворенных в невольской воде // Журн. Прикл. Химии. - 1954. - т.27. - №7. - с.774-781.
67. Природа Мурманской области. Мурманское кн.изд-во, 1964.
68. Птицын А.Б. Теоретическая геохимия. (Отв. Ред. И.Д. Рябчиков) – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2006. - 180 с.
69. Раткин Н.Е. Загрязнение воздушного бассейна // Экология и охрана природы Кольского Севера. Апатиты, 1994. - С. 146-155.
70. Рельеф и геологическое строение осадочного покрова Кольского полуострова. – М.-Л.: Наука, 1964.
71. Ресурсы поверхностных вод СССР // Антонова Т.С., Елшин Ю.Л., Тушинская М.Г. и др. Л: Гидрометеиздат. 1970. - Т.1. - 316 с.
72. Россолимо Л.Л. Изменение лимнических систем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. - 205 с.
73. Рощупко В.Ф. Об исследованиях Комитета по проблемам цветности воды в США. - Бюлл. ИБВВ АНСССР, 1970. - №5.- с.3-7.
74. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и

- перспективных для промысла районов Мирового Океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. - 202 с.
75. Савенко В.С. Геохимия океанского аэрозоля // Вестник МГУ, Сер. 5. География. - 1998. - №1. - С.28-32.
76. Савенко В.С., Даценко Ю.С., Эдельштейн К.К. Глобальные потоки фосфора в атмосфере и гидросфере // Вестник МГУ, Сер. 5. География. 1999. - № 2. - С.25-29.
77. Сандимиров С.С. ландшафтно-географические особенности формирования гидрохимического режима озер Кольского полуострова // Эколого-географические проблемы Кольского полуострова. Апатиты, 1999. - С. 97-111.
78. Свэлле М., Калабин Г. Загрязнение поверхностных вод в приграничных районах Норвегии и России. Апатиты, 1994. – 48с.
79. Семенов А.Д. Химическая природа органических веществ поверхностных вод. - Гидрохим. материалы, 1967. - том 65. - с. 155-172.
80. Семенов А.Д. Методы исследования органических веществ природных вод. Гидрохим. материалы, 1967. - том 65. - с. 173-185.
81. Сидоренко Г.И., Ицкова А.И. Никель (гигиенические аспекты охраны окружающей среды). М.: Медицина, 1980. - 176 с.
82. Скопинцев Б.А. Органическое вещество в природных водах [водный гумус]. Тр. Гос.океанограф. ин-та, 1950. - Вып. 17[29]. - С.290.
83. Скопинцев Б.А. Об обесцвечивании инфильтрационных вод в природных условиях. Вод. ресурсы, 1981. - №5. - с. 142-157.
84. Статистика: учебник для бакалавров / под ред. И. И. Елисеевой. — М. : Издательство Юрайт ; ИД Юрайт, 2011. — 565 с. — Серия : Бакалавр.
85. Улахович Н.А. Комплексы металлов в живых организмах // Металлы в живых организмах // Соросовский образовательный журнал, - 1997. - № 8. - С. 27-32.
86. Ферсман А.П. Геохимия. Л.: ОНТИ-химтеорет, 1937. - Т.2. - 354 с.

87. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: Учебник. – М.: Бином, 2007. - 512 с.
88. Хатчинсон Д. Лимнология [перевод с англ.]. - М.: изд-во «Прогресс», 1969. - с.507-530.
89. Хумитаке Секи. Органические вещества в водных экосистемах [перевод с англ.]. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. - С.199.
90. Цыцарин Г.В. Введение в гидрохимию. - М.: изд-во Московского Университета, 1988. - С. 104.
91. Экологический атлас Мурманской области. - М.- Апатиты: Изд. ИППЭС КНЦ РАН, МГУ, ЭКОР, 1999. - 48 с.
92. Яковлев Б.А. Климат Мурманской области. Мурманск, - 1961. - 200 с.
93. Benzaazoua M., Bussi ere B., Dagenais A-M., Archambault M. Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. // Environmental Geol. - 2004. - V. 46. - P. 1086–1101.
94. Bergkvist, B., Soil solution chemistry and metal budgets of spruce forest ecosystems in S. Sweden // Water, Air Soil Pollut. - 1987. - V.38. - P.131-154.
95. Besser, J.M., Brumbaugh, W.G., Ivey, C.D., Ingersoll, C.G., and Moran, P.W. Biological and Chemical Characterization of Metal Bioavailability in Sediments from Lake Roosevelt, Columbia River, Washington, USA. Archives of Environmental Contamination and Toxicology. - 2007. - V. 54(4). - P.557-570.
96. Brakke D.F., Henriksen A., Norton A.S. the relative importance of acidity sources for humic lakes in Norway // Nature. - 1987. - V. 329. - P. 432-434.
97. Campbell, P.G.C. and P.M. Stokes, Acidification and toxicity of metals to aquatic biota. Can. J. Fish Aquat. Sci. - 1985. - V.42. – P. 2034-2049.
98. Canadian acid rain assessment / Ed. D.S. Jeffries. Toronto, - 1997. - V. 3. - 113 p.

99. Chai J.-C., Onitsuk K., Hayashi S. Cr (VI) concentration from batch contact/tank leaching and column percolation test using fly ash with additives. // *J. Hazardous Materials* 2009. - V. 166. - N 1. - P. 67–73.
100. Clark J.M., Bottrell S.H., Evans C.D, Monteith D.T., Bartlett R., Rose R., Newton R.J., Chapman P.J. The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics // *Sci. of the Total Environment*. – 2010. – V. 13. - P. 2768-2775.
101. Clark, J. M., Bottrell, S. H., Evans, C. D., Monteith, D. T., Bartlett, R., Rose, R., Newton, R. J., & Chapman, P. J. The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics. *AMBIO*. - 2013. - V. 13. – P. 2768–2775.
102. Daly R.A. Densities of Rocks Calculated from Their Chemical Analyses. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A*, 1935. - V.21 (12). - P. 657-663.
103. Dawson J.C., Malcolm I.A., Middlemas S.J., Tetzlaff D., Soulsby C. Is the composition of dissolved organic carbon changing in upland acidic streams? // *Environ Sci Technol*. – 2009. - 43(20). – P. 7748–7753.
104. de Wit H.A., Mulder J., Hindar A., Hole L. Long-term increase in dissolved organic carbon in streamwaters in Norway is response to reduced acid deposition // *Environ Sci Technol*. - 2007. - V. 41(22). - P.7706–7713.
105. Dickson W. Properties of acidified waters. In: D. Drablos and A. Tollan (Eds), *Ecological Impact of Acid Precipitation*. SNSF-project, Oslo-As, Norway, 1980. - p. 75-83.
106. Dillon P.J., Reid R.A., de Grosbois E. The rate of acidification of aquatic ecosystems in Ontario, Canada // *Nature*. - 1987. - 329. - P. 45-48.
107. Driscoll C. T., Driscoll K. M., Roy K. M., et al. // *Environ. Sci. and Tec* 2003. - V.37. - P.2036–2042.
108. EMEP. Heavy metals: Transboundary pollution of the environment. EMEP Status Report 2/2004 June 2004 // <http://www.emep.int>.
109. *Eutrophication of Water: Monitoring, Assessment and Control*. Paris: OECD, 1982. - 150 p.

110. Evans C.D., Chapman P.J., Clark J.M., Monteith D.T., Cresser M.S. Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils. // *Glob Change Biol.* - 2006. - V. 12(11). - P. 2044–2053.
111. Evans, C. D.; Monteith, D. T.; Reynolds, B.; Clark, J. M. Buffering of recovery from acidification by organic acids. *Sci. Total Environ.* - 2008, V. 404. - P. 316–325.
112. Evans C.D., Monteith D.T., Harriman R. Long-term variability in the deposition of marine ions at west coast sites in the UK acid waters monitoring network: Impacts on surface water chemistry and significance for trend determination // *Sci. Total. Environ.* - 2011. - V. 265. - P.115-129.
113. Feuchtmayr H., Moran R., Hatton K., Cannor L., Yeyes T., Harley J., & Arkinson, D. Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *J. Appl. Ecol.* - 2009. - V. 46. - P. 713–723.
114. Galloway J.N. Acid deposition perspectives in time and space // *Water, Air, and Soil Pollut.* – 1995. - V. 85. - P. 15-24.
115. Galloway J. N., et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future // *Biogeochemistry.* – 2004. - V. 70(2). - P. 153–226.
116. George, W. *Ware Reviews of Environmental Contamination and Toxicology.* London, 1993. 412 p.
117. Henriksen A., I. Kämäri, M. Posh, and A. Wilander (1992) Critical loads of acidity: Nordic surface waters // *Ambio.* - V. 21. - P.356-363
118. Henriksen A., Skjelkvale B.L., Moiseenko T. et al. Northern European lake survey, 1995: Finland, Norway, Sweden, Denmark, Russian Kola, Russian Karelia, Scotland and Wales // *AMBIO.* - 1998. - V. 27. - P. 80-91.
119. ICP-water report: Acidification of surface water in Europe and North America: Trends, biological recovery and heavy metals. NIVA-report water, - 2007. - 115 p.
120. Intercomparison 1024: pH, Cond, HCO₃ NO₃+NO₂, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Zn.. International Cooperative

- Programme on Assessment and Monitoring of Acidification of Rivers and Lakes. Reports of Norwegian Institute of Water Research N 6029. Oslo, 2010.
121. ICME. International Council on Metals and the Environment. Persistence, bioaccumulation and toxicity of metals and metal compounds. Washington: Parametrix Inc., - 1995. - 93 p.
 122. ICP-Water report: Acidification of surface water in Europe and North America: Trends, biological recovery and heavy metals. - NIVA-report water. - 2007. - 115 p.
 123. Jeffrey S.K., Norton S.A., Haines T.A. et al. Mechanisms of episodic acidification in low-order streams in Maine, USA // Environ. Pollut. - 1992. - V. 78. - P. 37-44.
 124. Johansson K., Bringmark E., Lindevall L. et. Al. Effects of acidification on the concentration metals in running water in Sweden // Water, Air, and Soil Pollut. – 1995. - V. 85. - P. 779-784.
 125. Kalbe U., Berger W., Simon F.-G., Eckardt J., Christoph G. Results of interlaboratory comparisons of column percolation tests. // J. Hazardous Materials. - 2007. - V. 148. - P. 714–720.
 126. Kuylenstierna J.C.I., Rodhe M., Cinderby S., Hicks K. Acidification in developing countries: Ecosystem sensitivity and the critical load approach on a global scale // AMBIO. – 2001. – V. 30. - P. 20-28.
 127. Kvaeven B., Ulstein M.J., Skjelkvåle B.L., Raddum G.G., Hovind H. ICP Waters—an International Programme for Surface Water Monitoring // Water, Air, & Soil Pollution. – 2001. – V. 130. - P. 775-780.
 128. LaZerte, B.D., Metals and acidification: an overview // Water, Air Soil Pollut. - V. 31. – P. 569-576.
 129. Mannio J. Responses of headwater lakes to air pollution changes in Finland: Acad. Diss. Helsinki: Univ. Helsinki, 2001. - 226 p.
 130. Méndez-Ortiz B.A., Carrillo-Chávez A., Monroy-Fernández M.G. Acid rock drainage and metal leaching from mine waste material (tailings)

- of a Pb-Zn-Ag skarn deposit: environmental assessment through static and kinetic laboratory tests // *Revista Mexicana Ciencias Geológicas*. 2007. - V. 24. - N. 2. - P. 161-169.
131. Moiseenko T. Acidification and critical loads in surface waters: Kola, Northern Russia // *AMBIO*. - 1994. - V. 23(7). - P. 418-424.
132. Moiseenko T.I. The fate of metals in Arctic surface waters: Method for defining critical levels // *Sci. Total. Environ.* - 1999. - V. 236. - P. 19-39.
133. Moiseenko T., Kudrjavzeva L., Rodyshkin I. The episodic acidification of small streams in the spring flood period of industrial polar region, Russia // *Chemosphere*. - 2001. - V. 42. - P. 45-50.
134. Moiseenko T.I., Sandimirov C.C., Kudrjavzeva L.P. Peculiarities of Eutrofication of Arctic Region Waters // *Water Resources*. - 2001. - V.3. P.339-348.
135. Moiseenko T.I., Skjelkvale B.L., Gashkina N.A. et.al. Water chemistry in small lakes along a transect from boreal to arid ecoregions in European Russia: Effects of air pollution and climate change // *Applied Geochemistry*. - 2013. - V. 28. - P. 69-79.
136. 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
137. Monitor. Sura och forsurade vatten (C. Bernes (Ed.)) The national Environmental Protection Board, Solna (in Swedish), 1986.
138. Monteith, D.T., Stoddard, J.L., Evans, C.D., de Wit, H.A., Forsius, M., Hogasen, T., Wilander, A., Skjelkvale, B.L., Jeffries, D.S., Vuorenmaa, J., Keller, B., Kopacek, J. and Vesely, J., Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition 534 chemistry // *Nature*, 2007. – V. 450(7169). – P. 537-539
139. Mosello R. and Bianchi M. (1994-1997) Geiss HAQUACON-MedBas « Acid rain analysis», 1996. Ispra.

140. Nelson W.O., Campbell P.G.C. The Effects of acidification on the geochemistry of Al, Cd, Pb and Hg in freshwater environments: A literature review // *Environ. Pollut.* - 1991. - V. 71. - P. 91-130.
141. Nriagu, J. O. (1989), A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals // *Nature.* - 1989. - V. 338(6210). - P. 47– 49.
142. Pacyna J.M., Pacyna. E.G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // *Environ. Rev.* - 2001. - V.9. - P. 269 – 298,
143. Rauch, J. N., and J. M. Pacyna Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles // *Global Biogeochem. Cycles.* – 2009. - V.23. - GB2001
144. Reimann C., Ayras M., Chekushin V. Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region, 1998. - 745 p.
145. Reuss J.O., Cosby B.J., Wright R.F. Chemical processes governing soil and water acidification // *Nature.* – 1987. - V. 329. - P. 28-32.
146. Sapsford D.J., Bowell R.J., Dey M., Williams K.P. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage // *Minerals Engineer.* 2009. - V.22. N 1. - P. 25-36.
147. Satarug, S., Baker, J.R., Urbenjapol, S., Haswell-Elkins, M., Reilly, P.E.B., Williams, D.J., Moore, R. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population // *Toxicology letters.* - 2003. - V. 137. - P. 65-83.
148. Schindler D.W. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. // *Can J Fish Aquat Sci.* - 2001. - V. 58. - P.18–29
149. Sereda, J., Bogard, M., Hudson, J., Helps, D., Dessouki, T. Climate warming and the onset of salinization: rapid changes in the limnology of two northern plains lakes // *Limnologica.* - 2011. – V.41. – P. 1-9.
150. Skjelkvale B.L., Stoddard J.L., Andersen T. Trends in surface water acidification in Europe and North America (1989-1998) // *Water, Air, and Soil Pollut.* - 2001. - V. 130. - P. 787-792.

151. Skelkvale, B. L., Stoddard, J. L., Jeffries, D. S., Torseth, K., Hogasen, T., Bowman, J., Mannio, L., Monteith, D. T., et al. Regional scale evidence for improvements in surface water chemistry 1990-2001. - 2005. - *Environmental Pollution*. - V. 137(1). - P. 165–176.
152. Smil, V. Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences // *Annu. Rev. Energy Environ.* - 2000. - V. 25. - P. 53 – 88
153. Stoddard J.L., Moiseenko D.S., Lukewille A. et al. Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe // *Nature*. - 1999. - V. 401. - P. 575-578.
154. Standard methods for the examination of water and wastewater. Wash. (D.C.): Amer. Publ. Health Assoc., 1992.
155. Stumm W., Morgan J.J. Aquatic chemistry. N.Y.: Wiley, 1981. - 780 p.
156. Sullivan T.J. Aquatic effect of acid deposition. Boca Raton (Fla.): Levis, 2001. - 540 p.
157. Vuorenmaa J., Forsius M., Mannio J. Increasing trends of total organic carbon concentrations in small forest lakes in Finland from 1987 to 2003 // *Sci Total Environ.* – 2006. - V. 365(1–3). - P. 47–65.
158. Wathne B.M and Mosello R. Quality control of the chemical data. Oslo: Norw. Inst. For Water Research; Pallanza: Inst. Ital. di Idrobiol. 1998
159. Wright R.F., Norton S.A., Brakke D.F., Frogner T. Experimental verification of episodic acidification of freshwaters by sea salts // *Nature*. - 1988. - V. 334. - P. 422-424.
160. Yong R.N., Yaacob W.Z.W., Bentley S.P., Harris C., Tan B K. Partitioning of heavy metals on soil samples from column tests. // *Engineer. Geol.* 2001. V. 60. N 1-4. P. 307-322.

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.

Список рисунков

Рис.1. Геологическая карта Кольского региона (Гл. ред. Ф.П.Митрофанов, Ред.: А.Т.Радченко, К Гиллен., авт.-сост.: В.В.Балаганский, А.А.Басалаев, О.А.Беляев, В.И.Пожиленко, А.Т.Радченко, М.К.Радченко)

Рис. 2. Среднее годовое количество осадков Кольского региона (Экологический атлас Мурманской области, 1999)

Рис. 3. Почвенная карта Кольского региона (Экологический атлас Мурманской области, 1999)

Рис. 4. Болота Кольского региона (Ресурсы, 1970)

Рис. 5. Средний годовой сток рек Кольского региона (Экологический атлас Мурманской области, 1999)

Рис. 6. Центры техногенного загрязнения на территории Кольского региона (Доклад о состоянии..., 2013)

Рис. 7. Выбросы в атмосферу: 1 - Ni (тонн/год), 2 - Cu(тонн/год) и 3 - SO₂ (тыс. тонн /год) в период 1990-2009 гг.

Рис. 8. 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)

Рис. 9. Классификация озер по преобладающему катиону и аниону и соотношений между ними (по О.А. Алекину): 1 - гидрокарбонатно-кальциевые, 2 - гидрокарбонатно-магниевые, 3 - гидрокарбонатно-натриевые, 4 - хлоридно-натриевые, 5 - сульфатно-кальциевые, 6 - сульфатно-натриевые

Рис. 10. Карта-схема распределения антропогенно-закисленных и природно-подкисленных озер



Рис. 11. Распределение pH, суммы катионов, техногенных сульфатов и щелочности в воде малых озер Кольского Севера ($p=0.05$, $n=75$),  границы минимума и максимума,  значение 50 % - ых случаев



Рис. 12. Распределение содержания органического вещества и биогенных элементов в воде малых озер Кольского Севера ($p=0.05$, $n=97$),  границы минимума и максимума,  значения 50% - ых случаев

Рис. 13. Распределение элементов в воде озер Кольского Севера (значения представлены в нг/л в логарифмической шкале): 1 – в целом по региону, 2 - нейтральное (основные породы), 3 - антропогенно-закисленное (граниты), 4 - антропогенно-закисленное (кварцевые пески), 5 - природно-подкисленное (граниты)

Рис. 14. Распределение индекса токсичности вод в различных ландшафтно-геохимических районах Кольского Севера

Рис. 15. Химический состав фойяита

Рис. 16. Химический состав уртита

Рис. 17. Химический состав териберских гранитов

Рис. 18. Химический состав серебрянских гранитов

Рис. 19. Распределение pH в а) дистиллированной воде и в б) растворе разбавленной серной кислоты: 0 – «холостая проба», при взаимодействии с 1 – фойяитом, 2 – уртитом, 3 – териберскими гранитами, 4 – серебрянскими гранитами; 1,3,5,7 – недели



Рис. 20. Распределение содержания элементов при взаимодействии с фойяитом  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки



Рис. 21. Распределение содержания элементов при взаимодействии с уртитом  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки





Рис. 22. Распределение содержания элементов при взаимодействии с териберскими гранитами  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки

Рис. 23. Распределение содержания элементов при взаимодействии с серебрянскими гранитами  в нейтральной,  в кислой среде в 1, 3, 5, 7 недели обработки

Список таблиц

Таблица 1 к главе 1. Средний химический состав некоторых магматических пород, % (Войткевич и др., 1990).

Таблица 2 к главе 1. Количество озер и площадь их зеркал (Ресурсы, 1970).

Таблица 3 к главе 2. Пределы обнаружения элементов методом ICP-MS, в мкг/л

Таблица 4 к главе 3. Ландшафтные и геохимические характеристики выделенных районов Кольского региона (в числителе – пределы содержания, в знаменателе – среднее значение).

Таблица 5 к главе 3. Химический состав в воде озер Кольского Севера в целом по региону и по районам (в числителе приведены медианные значения, в знаменателе – пределы варьирования).

Таблица 6 к главе 3. Содержание биогенных элементов и органического вещества в воде озер выделенных районов (в числителе представлены медианные значения, в знаменателе – пределы варьирования)

Таблица 7 к главе 3. Распределение озер (n – количество озер) в зависимости от рН и цветности вод на Кольском Севере (по данным 2005 г.)

Таблица 8 к главе 3. Медианные значения основных показателей химического состава вод за 20-летний период (1990-2009) в различных районах Кольского Севера

Таблица 9 к главе 3. Динамика металлов за 15-летний период (1995-2009) в различных районах Кольского Севера (в числителе представлены медианные значения, в знаменателе – пределы варьирования)

Таблица 10 к главе 3. Медианные значения биогенных элементов за 20-летний период (1990-2009) в различных районах Кольского Севера

Таблица 11 к главе 3. Результаты анализа тренда показателей химического состава различных групп (категорий) вод малых озер за 20 – летний период (1990-2009 гг.)

Таблица 12 к главе 3. Тенденции изменения содержания цветности и органического вещества в воде озер выделенных районов

Таблица 13 к главе 4. Элементный состав вод в озерах Фенноскандии (1) и в озерах Норвегии (2) в мкг/л

Таблица 14 к главе 4. Средние геометрические (S) и коэффициенты вариации (v) содержаний микроэлементов (мкг/л) в воде озер выделенных районов Кольского Севера

Таблица 15 к главе 4. Корреляционная матрица

Таблица 16 к главе 4. Факторные нагрузки (значимые выделены жирным шрифтом), собственные значения и процент объясняемой дисперсии четырех факторов

Таблица 17 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (I район)

Таблица 18 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (II район)

Таблица 19 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (III район)

Таблица 20 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (IV район)

Таблица 21 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (V район)

Таблица 22 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (VI район)

Таблица 23 приложение 2 к главе 4. Факторные нагрузки (VII район)

Таблица 24 к главе 4. Взаимокоррелируемые компоненты в выделенных районах Кольского Севера

Таблица 25 к главе 4. Интенсивность водной миграции элементов в целом для Кольского Севера и в выделенных районах

Таблица 26 приложение 2 к главе 4. Химический состав пород, слагающих территорию Кольского региона

Таблица 27. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с фойяитом

Таблица 28. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с уртитом

Таблица 29. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с териберскими гранитами

Таблица 30. Содержание элементов в 1 – нейтральной, 2 – кислой среде при взаимодействии с серебрянскими гранитами

Таблица 31. Интенсивность миграции элементов в водной среде, где w – содержание элемента в воде (%), r - содержание элемента в породе (%)

Таблица 32. Интенсивность миграции элементов в кислой среде, где w – содержание элемента в воде (%), r - содержание элемента в породе (%)

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 к главе 1

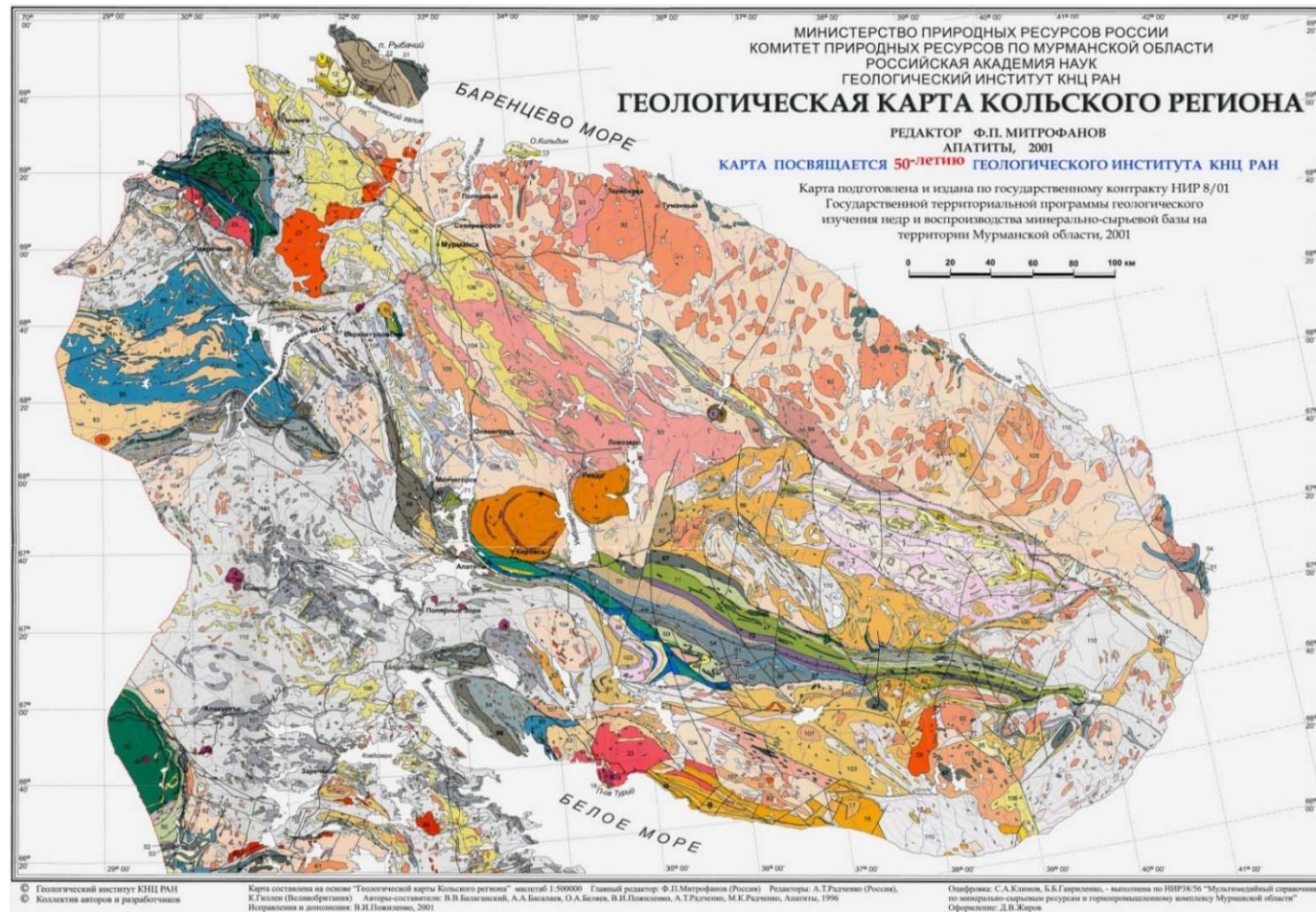


Рис. 1. Геологическая карта Кольского региона (Гл. ред. Ф.П.Митрофанов, Ред.: А.Т.Радченко, К Гиллен., авт.-сост.: В.В.Балаганский, А.А.Басалаев, О.А.Беляев, В.И.Пожиленко, А.Т.Радченко, М.К.Радченко)

ЛЕГЕНДА

Осадочные и вулканогенные породы	Преобладающий состав	Геологические подразделения	Осадочные и вулканогенные породы	Преобладающий состав	Геологические подразделения
1	Карбон Агилты, нефелиниты, пикриты, карбонаты, доломиты, арсилиты, туфопесчаники Щелочные сиениты	Харловская серия (Ш) Котозерский массив (КшМ)	83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110	Чарнокиты, граниты / моноклиориты, граниты / щелочные граниты, сиениты Сумий Нориты, габбронориты, диориты Габбро-анортозиты, габбро, диориты Перидотиты, пироксениты, габбронориты / перидотиты, габбронориты Дуниты, гарцбургиты Риолито-дациты, дациты, андезито-дациты Базальтовые порфириты, манделштейны, диабазы Кварциты, полевощист-кварцевые метасланцы Диабазы, туфобрекчия, амфиболиты Аркозовые метасланцы, известковые песчаники, известняки, конгломераты Андезито-базальты, амфиболиты Кварцевые метасланцы, метатравелиты Нестратифицированные комплексы неопределенного возраста Двуослудные, кварцполевошпатовые сланцы Слюдяные, углеродистые, хлорит-амфиболитовые сланцы, амфиболиты, кварциты Нориты, габбронориты, вебстериты Кислые гранулиты Основные гранулиты / гранулиты среднего состава, эггердиты	Нотозерский (НшС) / Койгерский (КшМ) / Канозерский (КшМ) / Райненчорский (РшС), Порчугубский (ПшС), Застейд (ЗшС) Имандровский (ИшМ) Главного хребта (ГшМ), Ковлячий (КшМ), Пыршин (ПшМ), Кандагальский (КшМ), Анкстундра (АшС), Жамучный (ЖшМ) Мончегорский (МшМ), Панских тундр (ПшМ), Федоровой тундры (ФшМ), Стономорский (ШшС), Сланцевый (СшС) / Алаурттинский (АшС) Нотозерский (НшС), Северояркенский (СшС) Сейдорченская (Ш) свита Кушанская (Кш), визаварская (вш) свиты Пурчская (ш) свита, кандалакская (кш), карека (кш), жула-кинери (Ш-Ш), корватундровская (ш) толща Талинская (ш) толща Пекская (ш) толща Терский комплекс (ТшС) Лавнозерский комплекс (ЛшС) Яуронская (ш), Лотинская (ш) толща Лалландский комплекс (ЛшС)
2	Девон Ультраосновные щелочные вулканы, алевролиты, туфопесчаники, туфы Щелочные ультрамафиты / нефелиновые сиениты / карбониты, дайки щелочных пород d_1 , трубчатая структура кимберлитов, щелочных пикритов, меланефелинитов	Харловская серия (Ш) Хибинский (ХшМ), Ловозерский (ЛшМ), Коздорский (КшМ), комплекс мыса Турего (ТшС), Саллаитта (СшМ), Африканда (АшМ), Сибяно (СшМ) Ловозерская серия (Лш)	106, 107, 108, 109, 110	Слюдяные, гранат-слюдяные парагнейсы и сланцы, конгломераты, кварциты Гранодиориты, тоналиты, плагиограниты / эггердиты	Йокаангский (ЙшС), Западноякский (ЗшМ), Верхнеюкский (ВшС), Понюйский (ПшМ), Белых тундр (БшМ), Сахарин (СшМ), Шигинский (ШшМ), Медвежий (МшС), Пачинский (ПшМ), Погеравский (ПшС), Аминский (АшС) Пещиноудровская (ш) свита Вычуртская (ш) свита / нерасчлененная Черульская свита (ш) / (ш-ш) свиты Воронинский (ВшС), Варзьянский (ВшС), Пактинский (ПшС) Териберский (ТшС), Чудьявский (ЧшС) Лидинский (ЛшС), Колозерский (КшС), Устьюнонский (УшС) Высокоземельская (ш), корватундровская (ш), ирангорская (ш) свиты Аларчский (АшС) / Касанский (КшС) Лобжинская (Лш), Бельменная (ш), араарченская (ш), воронетундровская (ш) свиты / лобжинская толща Патчерва (ш), помос (ш), палонная (ш), касамская (ш), ирангорская (ш), кончалобинская (ш), корватундровская (ш), уругуская (ш) свиты, ениский (ш) комплекс Коловайская (ш), пещинозерская (ш), кинемуурская (ш), кислоубская (ш), лавозерская свиты Центральнокольский (СшС), Мурманский (МшС), Терский (ТшС), Труновский (ТшС), Нотозерский (НшС), Лубовский (ЛшС), Веле-тундрский (ВшС), Канельяр (КшМ)
3	Верхний (ранний) протерозой Долериты (силлы, дайки d_1)	Баренцевогорский комплекс (БшС)	111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000	Базальтовые порфириты, диабазы Базальты, зеленые и углеродистые сланцы, туфы пикритовых порфиритов Переслаивание андезитовых и базальтовых порфиритов, туфов, алевролитовых сланцев Туфосланцы, филлиты с линзами карбонатных сланцев / песчаники, сланцы с линзами карбонатных пород и кварцитов	Йокаангский (ЙшС), Западноякский (ЗшМ), Верхнеюкский (ВшС), Понюйский (ПшМ), Белых тундр (БшМ), Сахарин (СшМ), Шигинский (ШшМ), Медвежий (МшС), Пачинский (ПшМ), Погеравский (ПшС), Аминский (АшС) Пещиноудровская (ш) свита Вычуртская (ш) свита / нерасчлененная Черульская свита (ш) / (ш-ш) свиты Воронинский (ВшС), Варзьянский (ВшС), Пактинский (ПшС) Териберский (ТшС), Чудьявский (ЧшС) Лидинский (ЛшС), Колозерский (КшС), Устьюнонский (УшС) Высокоземельская (ш), корватундровская (ш), ирангорская (ш) свиты Аларчский (АшС) / Касанский (КшС) Лобжинская (Лш), Бельменная (ш), араарченская (ш), воронетундровская (ш) свиты / лобжинская толща Патчерва (ш), помос (ш), палонная (ш), касамская (ш), ирангорская (ш), кончалобинская (ш), корватундровская (ш), уругуская (ш) свиты, ениский (ш) комплекс Коловайская (ш), пещинозерская (ш), кинемуурская (ш), кислоубская (ш), лавозерская свиты Центральнокольский (СшС), Мурманский (МшС), Терский (ТшС), Труновский (ТшС), Нотозерский (НшС), Лубовский (ЛшС), Веле-тундрский (ВшС), Канельяр (КшМ)
4	Венд Аркозовые, полимиктовые песчаники, алевролиты, арсилиты Кварцевые, аркозовые, полимиктовые песчаники, алевролиты с линзами фосфоритов	Пуманская (ш), чаломская (ш) свиты Кушанская свита (Кш)	111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000	Аркозовые метасланцы, известковые песчаники, известняки, конгломераты Андезито-базальты, амфиболиты Кварцевые метасланцы, метатравелиты Нестратифицированные комплексы неопределенного возраста Двуослудные, кварцполевошпатовые сланцы Слюдяные, углеродистые, хлорит-амфиболитовые сланцы, амфиболиты, кварциты Нориты, габбронориты, вебстериты Кислые гранулиты Основные гранулиты / гранулиты среднего состава, эггердиты	Йокаангский (ЙшС), Западноякский (ЗшМ), Верхнеюкский (ВшС), Понюйский (ПшМ), Белых тундр (БшМ), Сахарин (СшМ), Шигинский (ШшМ), Медвежий (МшС), Пачинский (ПшМ), Погеравский (ПшС), Аминский (АшС) Пещиноудровская (ш) свита Вычуртская (ш) свита / нерасчлененная Черульская свита (ш) / (ш-ш) свиты Воронинский (ВшС), Варзьянский (ВшС), Пактинский (ПшС) Териберский (ТшС), Чудьявский (ЧшС) Лидинский (ЛшС), Колозерский (КшС), Устьюнонский (УшС) Высокоземельская (ш), корватундровская (ш), ирангорская (ш) свиты Аларчский (АшС) / Касанский (КшС) Лобжинская (Лш), Бельменная (ш), араарченская (ш), воронетундровская (ш) свиты / лобжинская толща Патчерва (ш), помос (ш), палонная (ш), касамская (ш), ирангорская (ш), кончалобинская (ш), корватундровская (ш), уругуская (ш) свиты, ениский (ш) комплекс Коловайская (ш), пещинозерская (ш), кинемуурская (ш), кислоубская (ш), лавозерская свиты Центральнокольский (СшС), Мурманский (МшС),

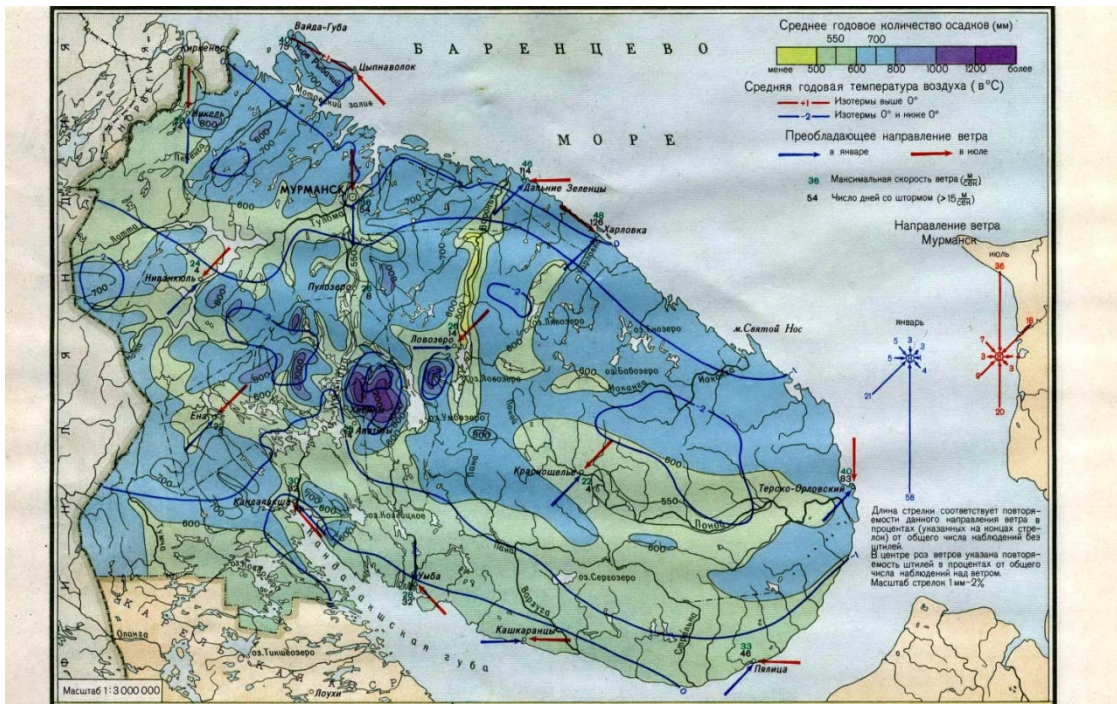


Рис. 2. Среднее годовое количество осадков Кольского региона (Экологический атлас Мурманской области, 1999)

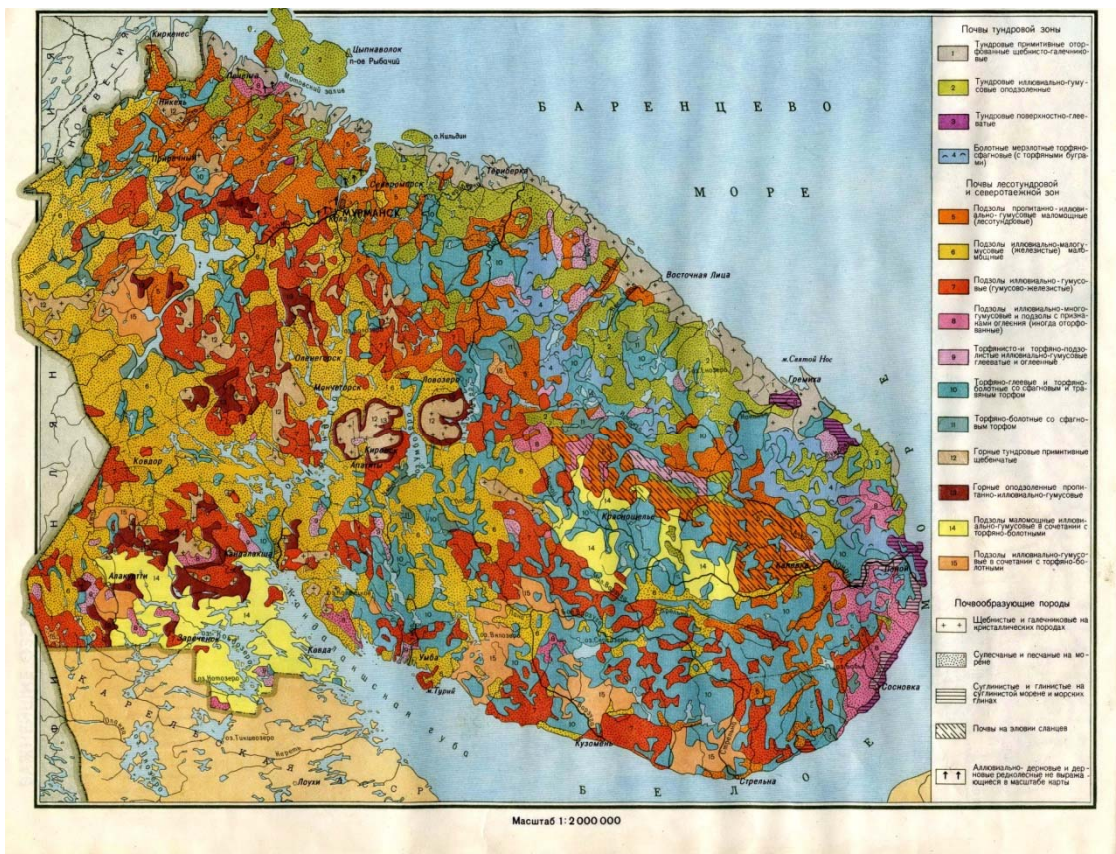


Рис. 3. Почвенная карта Кольского региона (Экологический атлас Мурманской области, 1999)

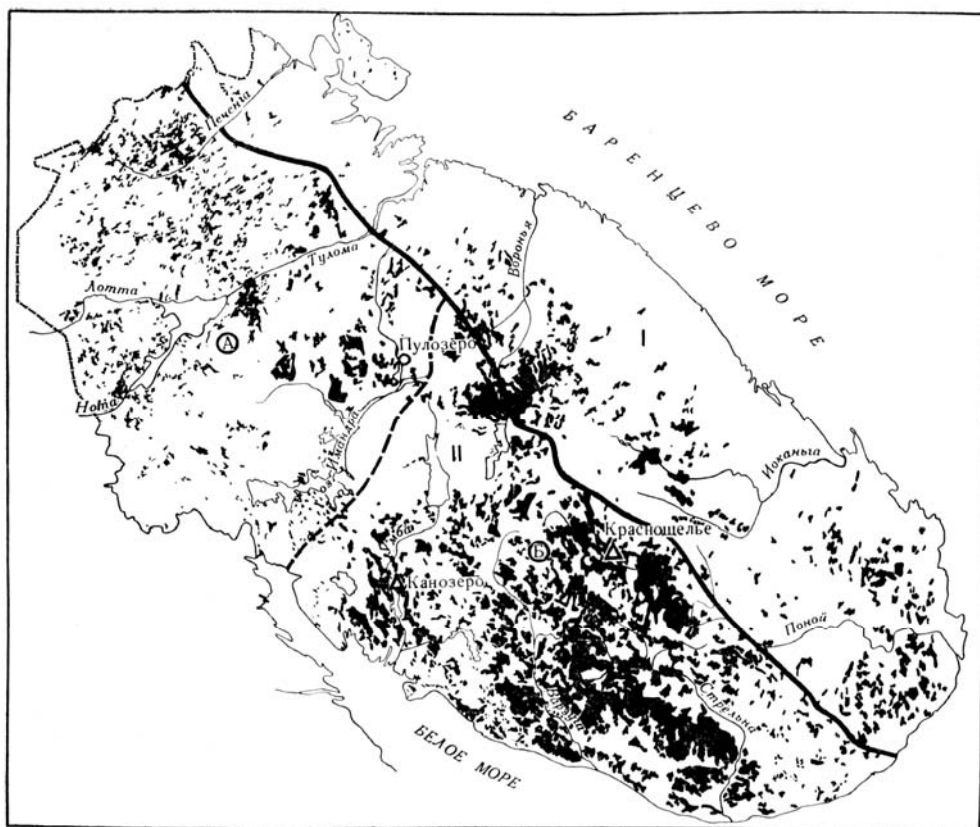


Рис. 4. Болота Кольского региона (Ресурсы, 1970)



Рис. 5. Средний годовой сток рек Кольского региона (Экологический атлас Мурманской области, 1999)

Приложение 2 к главе 4

Таблица 15. Корреляционная матрица

	pH	Σ кат.	AlK.	SO4*	P	POB	ANC	Al	Fe	Cu	Ni	Zn	Mn
pH	1.00	0.65	0.81	-	-	-	0.81	-	-	-	-	-	-
Σ кат.	0.65	1.00	0.88	-	-	-	0.87	-	-	-	-	-	-
AlK.	0.81	0.88	1.00	-	-	-	0.95	-	-	-	-	-	-
SO4*	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	0.81	0.75	-	-
P	-	-	-	-	1.00	0.64	-	0.76	0.80	-	-	0.94	0.89
POB	-	-	-	-	0.64	1.00	-	0.96	0.98	-	-	-	0.68
ANC	0.81	0.87	0.95	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-
Al	-	-	-	-	0.76	0.96	-	1.00	0.98	-	-	0.83	0.82
Fe	-	-	-	-	0.80	0.98	-	0.98	1.00	-	-	0.81	0.79
Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.99	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.99	1.00	-	-
Zn	-	-	-	-	0.94	0.68	-	0.83	0.81	-	-	1.00	0.91
Mn	-	-	-	-	0.89	0.68	-	0.82	0.79	-	-	0.91	1.00
Pb	-	-	-	0.70	0.68	-	-	-	-	-	-	0.63	-
Cd	-	-	-	-	0.86	-	-	0.51	0.53	-	-	0.88	0.67
As	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.80	0.83	0.50	-
Se	-	-	-	0.59	-	-	-	-	-	0.76	0.78	-	-
Rb	-	-	-	-	0.83	0.69	-	0.68	0.79	-	-	0.75	0.55
Sb	-	-	-	-	0.93	0.59	-	0.67	0.74	-	-	0.89	0.71
Ti	-	-	-	-	0.84	0.78	-	0.86	0.86	-	-	0.87	0.74
V	-	-	-	-	0.71	0.64	-	0.67	0.71	-	0.52	0.61	0.52
Re	-	-	-	-	0.72	0.88	-	0.81	0.91	-	-	0.66	0.54
Y	-	-	-	-	0.72	0.98	-	0.98	0.98	-	-	0.79	0.73
Nb	-	-	-	-	0.78	0.91	-	0.93	0.95	-	-	0.86	0.74
Bi	-	-	-	-	0.88	-	-	-	0.55	-	-	0.71	0.70
La	-	-	-	-	0.88	0.91	-	0.97	0.97	-	-	0.90	0.90

Продолжение табл. 15

	Pb	Cd	As	Se	Rb	Sb	Ti	V	Re	Y	Nb	Bi	La
pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ кат.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АК.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO4*	-	-	0.85	0.79	-	-	-	-	0.82	-	-	-	-
P	0.68	0.86	-	-	0.83	0.93	0.84	0.71	0.72	0.72	0.78	0.88	0.88
POB	-	0.35	-	-	0.69	0.59	0.78	0.64	0.88	0.98	0.91	-	0.91
ANC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	0.51	-	-	0.68	0.67	0.86	0.67	0.81	0.98	0.93	0.45	0.97
Fe	-	0.53	-	-	0.79	0.74	0.86	0.71	0.91	0.98	0.95	0.55	0.97
Cu	-	-	0.80	0.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	0.83	0.78	-	-	-	0.52	-	-	-	-	-
Zn	0.63	0.88	0.50	-	0.75	0.89	0.87	0.61	0.66	0.79	0.86	0.71	0.90
Mn	-	0.67	-	-	0.55	0.71	0.74	0.52	0.54	0.73	0.74	0.70	0.90
Pb	1.00	0.84	0.58	0.63	0.89	0.90	0.61	0.53	0.67	-	0.61	0.70	-
Cd	0.84	1.00	0.71	0.66	0.77	0.93	0.76	0.58	0.52	0.51	0.65	0.74	0.64
As	0.58	0.71	1.00	0.98	-	0.55	0.72	0.85	-	-	-	-	-
Se	0.63	0.66	0.98	1.00	-	0.50	0.61	0.66	-	-	-	-	-
Rb	0.89	0.77	-	-	1.00	0.94	0.80	0.74	0.92	0.75	0.83	0.76	0.76
Sb	0.90	0.93	0.55	0.50	0.94	1.00	0.81	0.67	0.78	0.69	0.82	0.85	0.78
Ti	0.61	0.76	0.72	0.61	0.80	0.81	1.00	0.89	0.78	0.88	0.83	0.51	0.89
V	0.53	0.58	0.75	0.66	0.74	0.67	0.89	1.00	0.74	0.72	0.58	-	0.72
Re	0.67	0.52	-	-	0.92	0.78	0.78	0.74	1.00	0.88	0.88	0.60	0.83
Y	-	0.51	-	-	0.75	0.69	0.88	0.72	0.88	1.00	0.95	-	0.95
Nb	0.61	0.65	-	-	0.83	0.82	0.83	0.58	0.88	0.95	1.00	0.56	0.92
Bi	0.70	0.74	-	-	0.76	0.85	0.51	-	0.60	-	0.56	1.00	0.63
La	-	0.64	-	-	0.76	0.78	0.89	0.72	0.83	0.95	0.92	0.63	1.00

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции >0.75 , n – число озер =97, $p=0.005$

Таблица 17. Факторные нагрузки (I район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	-0.663	0.576	-0.481	-0.470
Σ кат.	-0.313	0.928	-0.095	-0.140
SO4*	0.677	0.301	-0.202	-0.077
TN	-0.842	0.148	0.552	0.243
TP	-0.016	0.423	0.689	0.033
POB	-0.371	0.230	0.701	-0.042
ANC	-0.950	0.144	0.010	-0.259
Al	-0.093	0.770	0.276	-0.036
Fe	-0.670	0.627	0.319	0.237
Cu	-0.154	0.677	0.229	-0.016
Ni	-0.670	0.593	0.224	-0.659
Co	0.669	-0.159	0.134	-0.081
Zn	-0.580	0.098	0.164	-0.037
Mn	-0.632	0.358	0.055	0.014
Sr	-0.862	0.167	0.170	-0.447
Pb	0.322	-0.180	0.703	-0.058
Cr	-0.798	0.267	0.508	-0.127
Cd	0.980	-0.163	0.053	0.024
As	0.960	0.270	0.048	-0.043
I	0.755	0.334	-0.153	0.062
Br	-0.947	0.181	0.067	0.194
Li	0.142	-0.510	-0.184	-0.814
Se	-0.828	-0.026	-0.269	-0.472
Mo	-0.787	0.028	0.047	-0.483
U	0.647	-0.652	0.344	-0.055
Rb	-0.906	0.008	-0.119	0.405
Sb	0.978	0.180	0.043	-0.056
Ba	-0.854	0.224	0.379	0.261
Be	0.949	-0.193	0.195	-0.080
B	-0.925	0.303	0.052	-0.164
Sc	0.986	0.019	0.154	-0.053
Ti	-0.894	0.005	-0.363	0.028
V	-0.952	0.024	-0.109	0.217
Re	0.961	-0.142	0.223	0.058
Sn	-0.918	-0.077	-0.002	-0.310
Ga	0.735	0.425	-0.249	-0.021
Y	-0.111	0.542	0.787	0.261
Zr	-0.845	0.811	-0.298	0.316
Nb	0.923	-0.090	0.195	0.315
Ru	-0.337	0.333	0.614	-0.570
Rh	0.465	-0.059	-0.340	-0.076
Pd	-0.422	0.368	0.653	0.321
Ag	0.966	0.245	0.017	-0.059
Cs	-0.853	0.099	-0.026	0.498

Hf	0.542	-0.731	0.364	-0.049
W	0.950	-0.057	0.139	0.097
Bi	0.551	0.065	-0.294	0.564
La	-0.415	-0.028	-0.791	0.053
Ce	-0.562	-0.148	-0.727	0.040
Sm	0.861	-0.444	0.210	-0.039
Gd	0.830	-0.256	-0.286	0.177
Pr	0.770	-0.354	-0.141	-0.079
Nd	-0.848	0.190	-0.024	0.388
Th	-0.752	0.168	0.084	0.537
Собственные значения	34	11	7	5
% объясняемой дисперсии	58	18	11	8

Таблица 18. Факторные нагрузки (II район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	-0.217	-0.282	0.529	0.145
Σ кат.	-0.532	0.592	-0.499	0.020
SO4*	0.733	-0.402	-0.188	-0.056
TN	-0.528	-0.024	0.580	-0.422
TP	-0.297	-0.261	0.628	-0.410
Сорг.	-0.456	0.716	-0.014	-0.172
ANC	-0.843	-0.408	-0.228	0.113
Al	0.082	-0.092	0.518	-0.210
Fe	-0.593	-0.681	0.200	0.341
Cu	0.063	0.241	0.058	0.428
Ni	-0.370	0.320	0.168	0.467
Co	-0.083	0.103	0.023	-0.110
Zn	0.060	0.574	0.064	-0.303
Mn	-0.518	0.595	-0.359	0.075
Sr	-0.766	-0.480	-0.332	0.131
Pb	0.101	0.129	0.132	-0.089
Cr	-0.713	-0.476	0.384	0.242
Cd	0.649	-0.461	-0.406	-0.195
As	0.787	-0.440	-0.164	-0.157
I	0.751	-0.455	-0.055	-0.080
Br	-0.904	0.151	0.026	-0.178
Li	-0.393	-0.277	0.231	-0.623
Se	-0.641	0.422	-0.198	0.191
Mo	-0.625	0.069	-0.635	-0.333
U	0.746	-0.474	-0.007	-0.231
Rb	-0.803	-0.072	-0.427	-0.157
Sb	0.822	-0.474	-0.047	-0.164
Ba	-0.074	-0.085	0.118	0.030
Be	-0.062	0.207	0.492	0.073
B	-0.817	0.168	-0.071	-0.439
Sc	0.355	0.787	-0.047	0.132

Ti	-0.598	-0.101	0.270	0.607
V	-0.857	-0.056	0.199	-0.212
Re	-0.070	0.149	0.187	-0.150
Sn	-0.655	0.409	-0.223	-0.141
Ga	0.543	-0.463	0.082	-0.307
Y	-0.542	0.744	0.266	0.236
Zr	-0.542	0.712	0.201	0.352
Nb	-0.491	-0.786	0.232	0.181
Ru	-0.576	-0.252	-0.186	0.403
Rh	0.275	-0.246	0.018	-0.038
Pd	0.478	-0.469	-0.230	0.117
Ag	0.680	-0.403	0.034	-0.200
Cs	-0.647	0.437	0.172	-0.458
Hf	-0.171	-0.844	0.095	0.375
W	0.655	-0.392	-0.008	-0.158
Bi	-0.365	0.118	0.156	-0.289
La	-0.281	-0.109	-0.013	-0.322
Ce	-0.653	-0.041	0.085	-0.196
Sm	-0.539	0.748	0.179	-0.063
Gd	-0.390	0.820	0.269	-0.067
Pr	0.010	0.632	0.332	-0.340
Nd	-0.795	-0.372	0.300	-0.180
Th	-0.755	-0.379	0.322	-0.241
Собственные значения	20	11	5	4
% объясняемой дисперсии	33	18	9	7

Таблица 19. Факторные нагрузки (III район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	0.054	-0.494	0.558	-0.240
Σ kat.	-0.089	0.944	-0.233	-0.060
SO4*	0.333	0.824	-0.400	-0.015
TN	-0.184	-0.041	0.843	-0.055
TP	-0.126	-0.171	0.514	-0.136
Сорг.	0.986	-0.108	-0.021	-0.090
ANC	0.611	-0.357	-0.540	-0.412
Al	0.983	-0.128	-0.055	-0.094
Fe	0.685	-0.406	-0.385	0.049
Cu	-0.089	0.993	0.001	-0.045
Ni	-0.225	0.796	-0.298	0.307
Co	0.270	-0.496	-0.271	0.305
Zn	0.967	-0.182	-0.111	-0.125
Mn	0.534	0.027	-0.292	-0.354
Sr	0.724	-0.444	-0.381	-0.274
Pb	-0.007	0.432	0.768	-0.365
Cr	0.589	-0.566	0.177	-0.291

Cd	-0.702	-0.168	0.314	-0.328
As	-0.953	0.137	-0.231	-0.123
I	-0.887	-0.032	-0.327	-0.275
Br	-0.761	0.584	-0.048	0.217
Li	-0.925	-0.289	-0.056	0.010
Se	-0.675	-0.260	0.185	-0.031
Mo	0.090	-0.258	0.820	-0.406
U	-0.656	-0.260	-0.035	0.031
Rb	-0.597	0.643	-0.334	-0.276
Sb	-0.991	-0.080	0.014	-0,062
Ba	-0.707	0.519	0.122	-0.239
Be	-0.990	-0.080	0.024	-0.060
B	-0.646	0.546	0.303	-0.198
Sc	0.765	-0.576	0.251	0.032
Ti	-0.627	0.235	-0.397	-0.326
V	-0.784	-0.126	-0.129	0.575
Re	-0.688	-0.056	-0.029	-0.138
Sn	-0.812	0.459	-0.153	-0.030
Ga	-0.488	-0.071	0.047	-0.068
Y	-0.247	0.557	0.113	0.158
Zr	-0.643	-0.074	-0.041	0.677
Nb	-0.695	-0.113	-0.333	-0.234
Ru	-0.228	0.363	-0.176	0.658
Rh	-0.248	-0.681	0.009	0.567
Pd	0.418	-0.087	0.807	0.081
Ag	0.995	-0.043	0.018	-0.079
Cs	-0.540	0.451	0.070	-0.156
Hf	-0.130	0.468	0.109	-0.281
W	0.945	-0.164	0.000	-0.274
Bi	0.991	-0.067	0.029	-0.062
La	0.994	-0.055	0.017	-0.068
Ce	-0.334	0.482	0.067	0.500
Sm	0.970	-0.158	0.097	-0.086
Gd	0.994	-0.063	0.008	-0.054
Pr	0.991	-0.043	0.056	-0.077
Nd	-0.559	0.035	0.813	-0.148
Th	-0.584	-0.074	0.042	0.335
Собственные значения	30,0	10,6	6,7	4,5
% объясняемой дисперсии	51	18	11	8

Таблица 20. Факторные нагрузки (IV район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	-0.653	-0.421	-0.354	-0.057
Σ кат.	-0.318	0.824	-0.285	0.223
SO4*	0.113	0.587	0.164	0.061

N	-0.559	0.154	0.559	-0.154
P	0.473	-0.378	0.632	0.280
Copr.	0.969	-0.104	-0.099	-0.011
ANC	0.732	-0.330	-0.519	0.071
Al	0.110	0.665	-0.191	0.019
Fe	-0.313	0.555	-0.457	0.006
Cu	-0.196	0.804	0.326	0.096
Ni	-0.194	0.820	0.305	0.059
Co	0.968	-0.144	-0.065	0.005
Zn	0.134	-0.738	-0.199	0.394
Mn	0.223	-0.267	-0.441	-0.431
Sr	-0.333	-0.358	0.593	0.371
Pb	0.306	-0.369	0.589	0.381
Cr	-0.553	-0.162	0.455	-0.342
Cd	-0.508	-0.131	-0.154	0.382
As	-0.901	-0.374	-0.035	0.061
I	0.783	0.093	-0.010	-0.004
Br	0.574	-0.281	0.356	0.467
Li	-0.177	-0.211	0.091	-0.386
Se	-0.383	0.124	0.364	-0.027
Mo	-0.402	-0.047	-0.489	0.231
U	-0.678	-0.126	-0.166	-0.326
Rb	-0.211	0.049	-0.177	0.192
Sb	-0.915	-0.163	-0.082	0.011
Ba	-0.495	-0.460	0.139	-0.267
Be	-0.980	-0.078	-0.049	0.055
B	-0.456	-0.457	0.028	0.501
Sc	-0.739	-0.202	-0.130	-0.249
Ti	-0.090	-0.448	0.102	-0.308
V	-0.695	0.019	-0.081	0.321
Re	-0.649	0.043	-0.256	0.160
Sn	-0.652	-0.245	-0.103	0.250
Ga	-0.912	-0.182	-0.096	-0.037
Y	-0.109	0.837	0.110	-0.381
Zr	-0.584	0.080	-0.431	0.115
Nb	-0.141	-0.263	-0.141	-0.031
Ru	-0.274	0.602	0.037	-0.028
Rh	-0.425	-0.254	0.140	0.310
Pd	0.573	0.185	-0.070	0.004
Ag	-0.984	-0.063	-0.080	0.040
Cs	-0.420	-0.139	0.462	0.120
Hf	-0.079	0.049	-0.392	0.091
W	0.900	-0.172	-0.087	0.006
Bi	-0.098	-0.007	0.574	0.435
La	0.172	-0.840	0.359	-0.186
Ce	-0.403	-0.750	0.339	-0.237
Sm	-0.048	0.187	-0.041	-0.098
Gd	-0.589	-0.711	0.101	-0.158

Pr	0.785	-0.465	0.022	-0.102
Nd	-0.294	-0.529	0.233	-0.519
Th	-0.355	-0.327	0.244	-0.190
Собственные значения % объясняемой дисперсии	17,9 30	10,0 17	5,9 10	4,5 8

Таблица 21. Факторные нагрузки (V район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	-0.454	0.111	0.683	-0.496
Σ кат.	0.718	-0.064	-0.597	0.159
SO4*	-0.112	0.280	0.759	0.061
N	-0.210	0.121	0.589	-0.555
P	-0.258	0.035	0.601	-0.564
Сорг.	0.061	0.634	-0.428	-0.598
ANC	0.772	-0.219	0.481	0.136
Al	0.189	0.873	-0.671	-0.275
Fe	-0.101	0.550	-0.301	0.274
Cu	0.325	0.123	-0.600	0.357
Ni	-0.253	0.072	-0.784	0.381
Co	0.514	0.840	0.040	-0.064
Zn	0.633	0.666	-0.025	0.152
Mn	-0.660	-0.383	0.343	0.403
Sr	-0.781	-0.266	0.414	0.212
Pb	0.321	-0.084	-0.353	0.479
Cr	-0.776	-0.439	-0.384	0.049
Cd	0.362	-0.454	0.545	0.225
As	0.575	0.534	0.423	0.290
I	0.100	-0.449	-0.484	-0.026
Br	-0.419	0.481	-0.157	-0.381
Li	-0.422	0.705	0.088	-0.325
Se	-0.238	0.581	0.055	0.032
Mo	-0.158	0.315	0.755	0.284
U	0.631	0.731	0.190	-0.105
Rb	0.673	0.311	-0.475	0.236
Sb	0.637	0.721	0.210	-0.092
Ba	0.864	-0.216	-0.259	-0.135
Be	0.173	0.013	-0.663	0.657
B	-0.464	0.511	0.203	0.347
Sc	0.563	-0.693	0.125	-0.206
Ti	0.535	0.006	-0.555	0.144
V	0.770	0.060	-0.343	0.401
Re	0.702	-0.665	-0.023	0.040
Sn	-0.285	0.337	0.516	-0.634
Ga	-0.076	-0.184	-0.245	0.346
Y	-0.787	-0.575	-0.165	-0.109

Zr	-0.795	-0.572	-0.097	-0.107
Nb	-0.730	-0.656	-0.070	-0.086
Ru	-0.679	-0.184	0.239	0.247
Rh	-0.220	0.371	-0.316	-0.515
Pd	-0.052	0.683	0.476	-0.171
Ag	0.632	0.732	0.176	-0.106
Cs	-0.007	0.545	-0.239	-0.543
Hf	-0.373	0.589	0.120	0.005
W	0.598	0.597	0.258	-0.153
Bi	-0.050	0.423	-0.339	-0.391
La	-0.236	0.192	-0.045	-0.436
Ce	-0.378	0.113	-0.100	-0.416
Sm	0.816	-0.448	-0.036	-0.023
Gd	0.810	-0.459	-0.110	-0.297
Pr	0.739	-0.503	-0.290	-0.260
Nd	0.833	-0.398	-0.213	-0.253
Th	0.708	-0.305	-0.420	-0.240
Собственные значения	17	13	10	6
% объясняемой дисперсии	29	22	17	10

Таблица 22. Факторные нагрузки (VI район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	0.420	0.651	-0.532	-0.119
Σ kat.	0.113	0.631	-0.720	0.107
SO4*	0.640	-0.429	0.355	0.039
N	-0.502	-0.467	0.580	0.023
P	-0.124	-0.013	0.503	-0.022
Сорг.	0.964	0.135	-0.071	-0.026
ANC	0.096	0.767	-0.575	0.087
Al	-0.970	0.022	0.049	-0.007
Fe	0.861	0.259	0.130	0.000
Cu	-0.344	0.794	-0.297	0.210
Ni	-0.169	0.773	0.270	0.034
Co	-0.135	-0.757	0.603	-0.065
Zn	-0.496	-0.667	0.255	0.177
Mn	0.890	0.284	0.241	-0.036
Sr	-0.039	0.646	-0.705	-0.083
Pb	0.130	-0.641	0.540	-0.431
Cr	0.922	0.038	-0.191	-0.046
Cd	-0.360	-0.445	0.634	0.197
As	-0.427	0.377	-0.383	-0.135
I	-0.549	0.501	-0.046	0.278
Br	-0.681	0.511	-0.394	-0.114
Li	-0.174	-0.279	0.327	0.379

Se	0.653	-0.045	0.168	-0.459
Mo	0.373	0.557	-0.596	0.223
U	0.825	0.499	0.037	0.189
Rb	0.681	0.118	-0.260	0.177
Sb	-0.009	-0.600	-0.384	0.662
Ba	0.928	0.295	-0.091	-0.105
Be	-0.409	-0.638	-0.465	0.215
B	-0.046	-0.365	0.181	0.827
Sc	-0.679	0.638	-0.077	-0.300
Ti	0.931	0.198	0.038	-0.096
V	0.727	-0.216	0.111	0.546
Re	0.925	0.034	0.127	0.293
Sn	0.161	0.195	0.540	0.937
Ga	0.886	-0.323	-0.282	0.045
Y	0.965	0.148	0.033	0.034
Zr	0.793	0.410	0.204	0.112
Nb	0.574	0.436	0.389	-0.413
Ru	0.092	-0.468	0.262	0.536
Rh	0.564	0.077	-0.050	-0.631
Pd	0.267	0.277	-0.058	0.796
Ag	-0.324	-0.637	0.618	-0.218
Cs	0.437	0.321	-0.455	-0.011
Hf	0.459	0.568	-0.282	-0.137
W	-0.471	-0.506	-0.434	0.194
Bi	-0.042	-0.762	0.495	0.133
La	0.908	-0.346	-0.178	0.028
Ce	0.947	-0.278	-0.123	0.044
Sm	0.972	0.168	0.056	0.136
Gd	0.952	0.000	0.045	0.092
Pr	0.979	-0.119	-0.076	0.015
Nd	0.983	-0.065	-0.099	0.027
Th	0.926	0.191	0.231	0.070
Собственные значения	25,0	11,4	7,7	5,2
% объясняемой дисперсии	42	19	13	9

Таблица 23. Факторные нагрузки (VII район)

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	-0.217	-0.282	-0.529	0.145
Σкат.	-0.532	-0.499	0.592	0.020
SO4*	-0.188	-0.402	0.733	-0.056
N	0.580	-0.024	-0.528	-0.422
P	0.628	-0.261	-0.297	-0.410
Сорг.	0.716	-0.456	-0.014	-0.172
ANC	-0.843	-0.408	-0.228	0.113
Al	0.082	0.518	-0.092	-0.210

Fe	0.681	0.593	0.200	0.341
Cu	0.063	0.241	0.058	0.428
Ni	-0.370	0.320	0.168	0.467
Co	-0.083	0.103	0.023	-0.110
Zn	0.060	0.064	0.574	-0.303
Mn	-0.518	0.595	-0.359	0.075
Sr	0.766	-0.480	-0.332	0.131
Pb	0.101	0.129	0.635	-0.089
Cr	-0.713	-0.476	0.384	0.242
Cd	0.649	-0.461	-0.406	-0.195
As	0.787	-0.440	-0.164	-0.157
I	0.751	-0.455	-0.055	-0.080
Br	-0.904	0.151	0.026	-0.178
Li	-0.393	-0.277	0.231	-0.623
Se	-0.641	0.422	-0.198	0.191
Mo	-0.625	0.069	0.135	-0.333
U	0.746	-0.474	-0.007	-0.231
Rb	-0.803	-0.072	-0.427	-0.157
Sb	0.822	-0.474	-0.047	-0.164
Ba	-0.074	-0.085	0.118	0.030
Be	-0.062	0.207	0.492	0,073
B	-0.817	0.168	-0.071	-0,439
Sc	0.355	0.787	-0.047	0,132
Ti	-0.598	-0.101	0.270	0,607
V	-0.857	-0.056	0.199	-0,212
Re	-0.070	0.149	0.187	-0,150
Sn	-0.655	0.409	-0.223	-0,141
Ga	0.543	-0.463	0.082	-0,307
Y	-0.542	0.744	0.266	0,236
Zr	-0.542	0.712	0.201	0,352
Nb	-0.491	-0.786	0.232	0,181
Ru	-0.576	-0.252	-0.186	0,403
Rh	0.275	-0.246	0.018	-0,038
Pd	0.478	-0.469	-0.230	0,117
Ag	0.680	-0.403	0.034	-0,200
Cs	-0.647	0.437	0.172	-0,458
Hf	-0.171	0.844	0.095	0,375
W	0.655	-0.392	-0.008	-0,158
Bi	-0.365	0.118	0.156	-0,289
La	-0.281	-0.109	-0.013	-0,322
Ce	-0.653	-0.041	0.085	-0,196
Sm	-0.539	0.748	0.179	-0,063
Gd	-0.390	0.820	0.269	-0,067
Pr	0.010	0.632	0.332	-0,340
Nd	-0.795	-0.372	0.300	-0,180
Th	-0.755	-0.379	0.322	-0,241
Собственные значения	20	11	5	4

% объясняемой дисперсии	33	18	9	7
-------------------------	----	----	---	---

Таблица 26. Химический состав пород, слагающих территорию Кольского региона

Элемент, %	I	II	III	IV	V	VI	VII
Si*10 ⁰	35.09	34.43	57.30	34.29	18.03	30.70	33.96
Ti*10 ⁰	0.13	0.29	0.83	0.16	0.04	0.38	0.06
Al*10 ⁰	7.68	5.41	17.48	7.43	0.34	8.21	7.96
Fe*10 ⁰	1.02	4.12	13.81	0.06	26.62	4.61	1.13
Mn*10 ⁰	0.02	0.06	0.24	0.02	0.06	0.06	0.02
Mg*10 ⁰	0.23	0.67	3.63	0.30	1.67	1.76	0.27
Ca*10 ⁰	1.24	1.42	10.68	0.79	1.75	1.83	1.05
P*10 ⁰	0.02	0.02	0.06	0.02	0.09	0.04	0.02
Na*10 ⁰	1.24	1.10	2.19	3.00	0.02	1.30	2.37
K*10 ⁰	2.46	0.95	9.38	2.06	0.10	1.98	2.71
Li*10 ⁻³	3.32	0.02	4.17	8.41	50.85	7.13	3.89
Rb*10 ⁻²	1.99	0.07	0.41	7.50	6.63	2.27	3.30
Cs*10 ⁻⁴	0.55	-	4.06	9.34	44.22	11.88	9.34
Ba*10 ⁻²	42.66	95.35	4.61	175.95	70.75	19.15	19.34
Sr*10 ⁻²	23.27	24.94	3.99	21.42	66.33	9.81	5.97
B*10 ⁻³	34.35	67.48	1.10	6.12	243.21	3.73	7.01
La*10 ⁻³	3.88	54.27	2.20	6.50	154.77	11.88	7.01
Ce*10 ⁻³	4.43	99.75	3.29	12.24	44.22	23.09	15.31
Nd*10 ⁻³	2.22	42.54	2.20	4.59	309.54	11.20	7.27
Y*10 ⁻³	5.54	23.47	1.43	2.52	287.43	13.58	7.53
Zr*10 ⁻²	4.16	44.01	1.81	3.82	48.64	4.96	4.15
Zn*10 ⁻³	0.55	77.74	4.72	26.77	5.70	23.09	16.61
Pb*10 ⁻⁴	66.49	278.71	5.49	221.85	663.30	50.93	54.50
Cu*10 ⁻³	9.97	30.80	1.43	4.82	442.20	23.09	3.63
Cr*10 ⁻³	38.41	217.10	8.79	6.96	420.09	39.04	3.63
V*10 ⁻⁴	55.41	114.42	157.04	175.95	6854.07	0.04	72.67
Ni*10 ⁻³	7.20	38.14	3.73	4.82	353.76	203.71	3.37
Co*10 ⁻³	1.66	20.54	2.31	2.45	132.66	6.79	1.04
Sc*10 ⁻³	-	38.14	1.65	3.52	66.33	7.81	4.41

Приложение 3 к главе 5

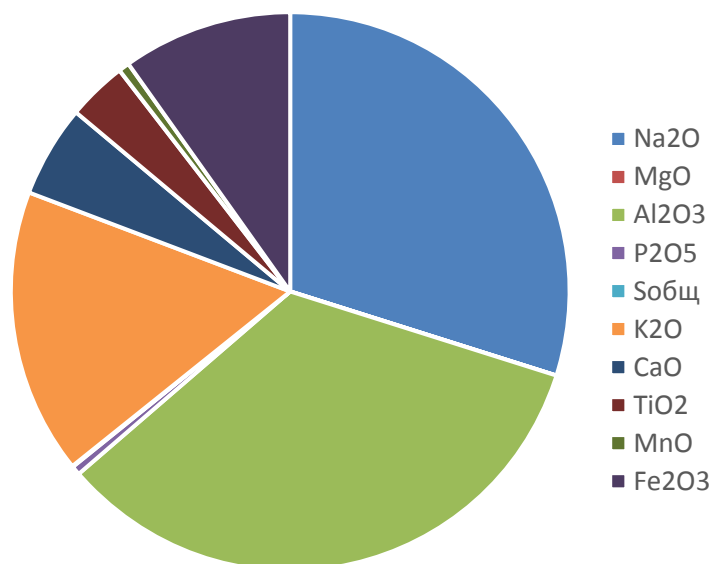


Рис. 15. Химический состав фойяита

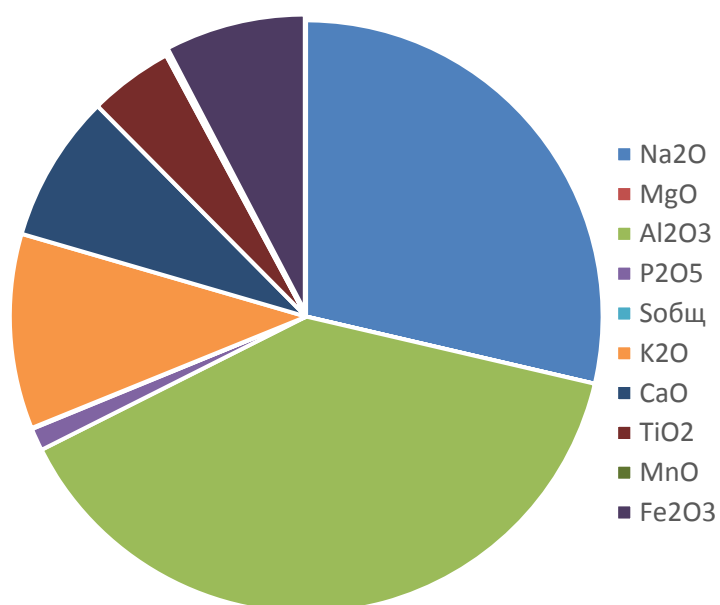


Рис. 16. Химический состав уртыта

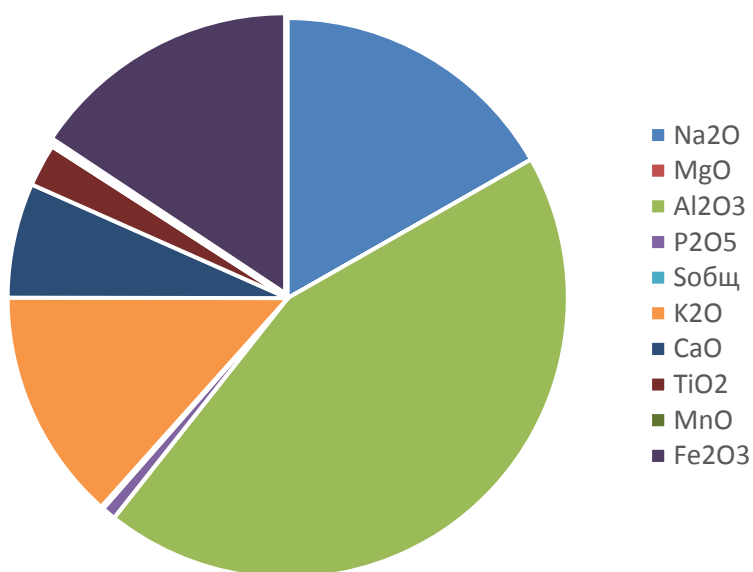


Рис. 17. Химический состав териберских гранитов

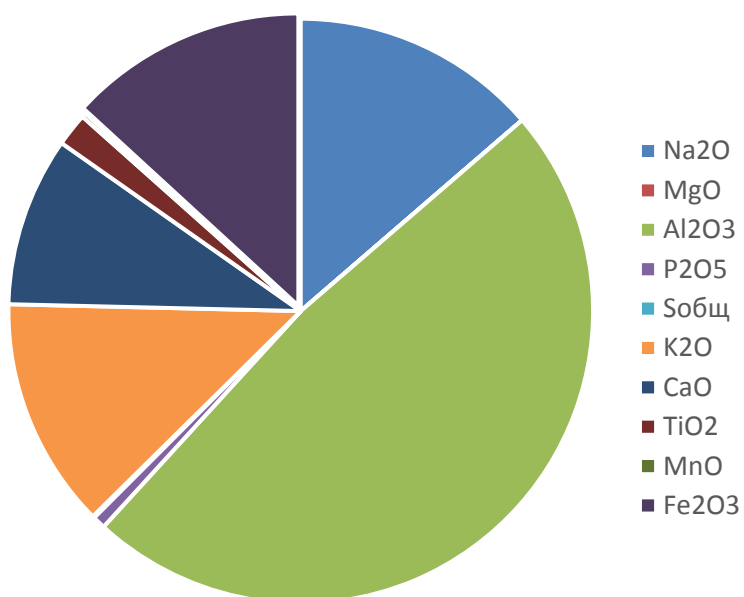


Рис. 18. Химический состав серебрянских гранитов