ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2021, том 5, № 1, с. 74-93

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 550.43

АЭРОЗОЛЬНОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ В КОМПОНЕНТЫ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЬСКОМ ИМПАКТНОМ РАЙОНЕ

© 2021 г. А.В. Евсеев, Е.А. Шахпендерян, Х.С. Султыгова

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: sultygovakhadizat@gmail.com

Поступила в редакцию 20.02.2020. После доработки 01.03.2020. Принята к публикации 01.03.2020.

Кольский полуостров является одним из наиболее освоенных арктических районов России. Его интенсивное промышленное развитие длится уже более 80 лет. Вблизи промышленных объектов за этот период произошли на этой территории негативные изменения разной степени интенсивности в природных ландшафтах, которые обусловили появление импактных районов. Возникновение импактных районов на арктической территории связано с техногенным загрязнением природной среды, морфологическими изменениями геосистем разных рангов. Одним из таких районов является Центрально-Кольский, расположенный в центре Кольского полуострова вблизи городов Мончегорск и Кировск, где происходит техногенное воздействие на местные геосистемы от комбината цветной металлургии «Североникель» АО «Кольская ГМК» и горнодобывающего предприятия АО «Апатит». За последние два десятилетия сложившуюся негативную ситуацию с состоянием местных геосистем удалось частично восстановить благодаря предпринятым АО «Кольской ГМК» мерам по модернизации производства и по рекультивации нарушенных природных территорий. Необходимостью оценки этих мер как ключевых в вопросе восстановления экологического благополучия исследуемого района и обуславливается актуальность данного исследования. Для написания работы были использованы литературные источники, региональные обзоры состояния природной среды, материалы собственных полевых и ранее проведенных исследований кафедры рационального природопользования географического факультета МГУ в центральной части Кольского полуострова. Для получения необходимого результата использовался ряд методов: метод биоиндикации загрязнения атмосферы (лихено- и бриоиндикации), сравнительно-географический, картографический, геохимический, математический. В ходе исследования выделены зоны воздействия источников аэротехногенных поллютантов на компоненты природной среды центральной части Кольского полуострова. Проведенное исследование показало, что в импактном районе происходит самовосстановление природных экосистем в результате снижения объемов выбросов после модернизации производства.

Ключевые слова: Кольский полуостров, Хибины, Мончегорск, комбинат «Североникель», АО «Апатит», биоиндикация, тяжелые металлы, стронций, соединения серы.

DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10078

Вопросам экологического состояния природной среды российской Арктики в последнее десятилетие уделяется особое внимание, учитывая важную экономическую, социальную и экологическую роль этого региона. В настоящее время Мурманская область является самым развитым районом Российской Арктики. Актуальными являются проблемы воздействия техногенных поллютантов на ее территорию.

Техногенное воздействие в центральной части Кольского полуострова (рис. 1), где в настоящее время основными источниками выбросов являются комбинат «Североникель» АО (фото 1) «Кольская горно-металлургическая компания» и горнодобывающего предприятия АО «Апатит», сформировало Центрально-Кольский импактный район (Евсеев, Красовская 1996).

Рис. 1. Географическое положение района исследования (Топографическая …, 2019).

Фото 1. Вид на комбинат «Североникель», г. Мончегорск (фото Х.С. Султыговой).

Территория вблизи горно-металлургического комбината «Североникель» представляет собой техногенную пустошь, образовавшуюся в результате длительного функционирования предприятия. В структуре атмосферных выбросов комбината «Североникель» преобладают соединения серы и металлосодержащие аэрозоли (Душкова, Евсеев, 2010).

В районе разработки и обогащения апатито-нефелиновых руд в горном массиве Хибин не отмечается такого интенсивного опустошения ландшафтов, как вблизи предприятий цветной металлургии. Однако наблюдаются механические нарушения почв и горных пород в результате разработки карьеров и т.п. Отмечается высокая запыленность территории и повышенное содержание стронция в воздухе, почвах и растительности (Евсеев, Красовская, 1990).

Следует отметить, что воздействие предприятий подобного уровня для лесотундровых и северотаежных ландшафтов исследуемой территории наиболее критично – их ассимиляционный потенциал и способность к самовосстановлению крайне малы. И именно поэтому территория в радиусе нескольких десятков километров вокруг комбината «Североникель» представляет собой типичный импактный район – растительный и почвенный покровы местами деградировали, а в депонирующих средах накапливаются загрязняющие вещества (Евсеев, Красовская, 1997).

В последние несколько лет сложившуюся ситуацию удалось частично восстановить благодаря мерам, предпринятым «Кольской ГМК», по модернизации производства и рекультивации нарушенных природных территорий. Необходимостью оценки этих мер как ключевых в вопросе восстановления экологического благополучия исследуемой территории и обуславливается актуальность данного исследования.

Цель работы – выявление зон распространения основных техногенных поллютантов появившихся при эксплуатации крупных промышленных предприятий на территории исследования.

Материалы и методы

Наиболее значительные изменения природной среды, вплоть до образования техногенной пустоши, наблюдаются вблизи предприятия цветной металлургии.

Для проведения исследования в этом районе нами была выбрана трансекта, проходящая по долине озера Имандра в северном и южном направлении от комбината «Североникель» протяженностью более 40 км с целью определения границ импактного района, где было заложено более 20 точек опробования. Кроме того, для сопоставления отобраны пробы близ г. Кандалакша, п. Умба, с. Териберка и в Хибинском горном массиве, в районе разработки и обогащения апатито-нефелиновых руд. Точки отбора проб мхов, лишайников и почв показаны на рисунках 2-4.

Размещение точек опробования обусловлено характером распространения антропогенных загрязнителей в соответствии с направлением преобладающих ветров. Также оценивалось влияние орографического фактора. Точки отбора проб были размещены в соответствии с действующим Руководящим Документом 52.44.2-94 от 1994 г. (РД …, 1994), согласно которому пробы отбирались по основным румбам ветров на расстоянии 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 и 40 км от источников загрязнения. Также отбор проб проводился в точках геоэкологического мониторинга, заложенных ранее сотрудниками кафедры рационального природопользования и за пределами 40 км зоны.

При проведении работ по данной теме был проанализирован фондовый и литературный материал, а также произведен отбор проб, которые в дальнейшем подверглись обработке с целью получения необходимой информации для отображения распределения аэротехногенных поллютантов и сопоставления полученной информации с уже имеющейся. Работа состояла из 3 этапов: подготовительного, полевого и лабораторной обработки проб.

Для проведения анализа распространения аэротехногенных поллютантов по территории исследуемого района применялись методы биоиндикации (бриоиндикации и лихеноиндикации). Данные методы заключаются в анализе содержания загрязняющих веществ во мхах и лишайниках. Различные реакции мхов и лишайников на воздействие загрязняющих веществ позволяют использовать их в качестве биоиндикаторов-мониторов. Были отобраны отдельные виды мхов и лишайников (*Sphagnum* sp., *Cladonia* sp.), широко представленные на изучаемой территории и живущие преимущественно за счет атмосферного питания.

При исследовании лишайников отчетливо прослеживаются биологические реакции на антропогенное воздействие. Главной особенностью этой группы организмов является их высокая чувствительность к изменению химического состава атмосферного воздуха. Лишайники хорошо аккумулируют тяжелые металлы и другие токсиканты, содержащиеся в воздухе поэтому они используются для определения закономерностей выбросов и для выделения местонахождения источников загрязнения, основываясь на изменении количества накопленных згрязняющих веществ (Опекунова, 2016).

Бриофиты (мхи) имеют ряд общих с лишайниками черт – сравнительно небольшие размеры, обычно многолетний цикл развития, близкие экологические и физиологические свойства. В отличие от лишайников мхи обладают гидрофитной структурой и высокой способностью к влагонасыщению и сорбируют больше поллютантов по сравнению с лишайниками ксерофитизированной структурой (Черненькова, 2002).

Биоиндикаторы позволяют нам составить пространственную картину накопления поллютантов как в целом по региону, так и на отдельных территориях. Методы биоиндикации широко применяются в Скандинавии (Черненькова, 2002).

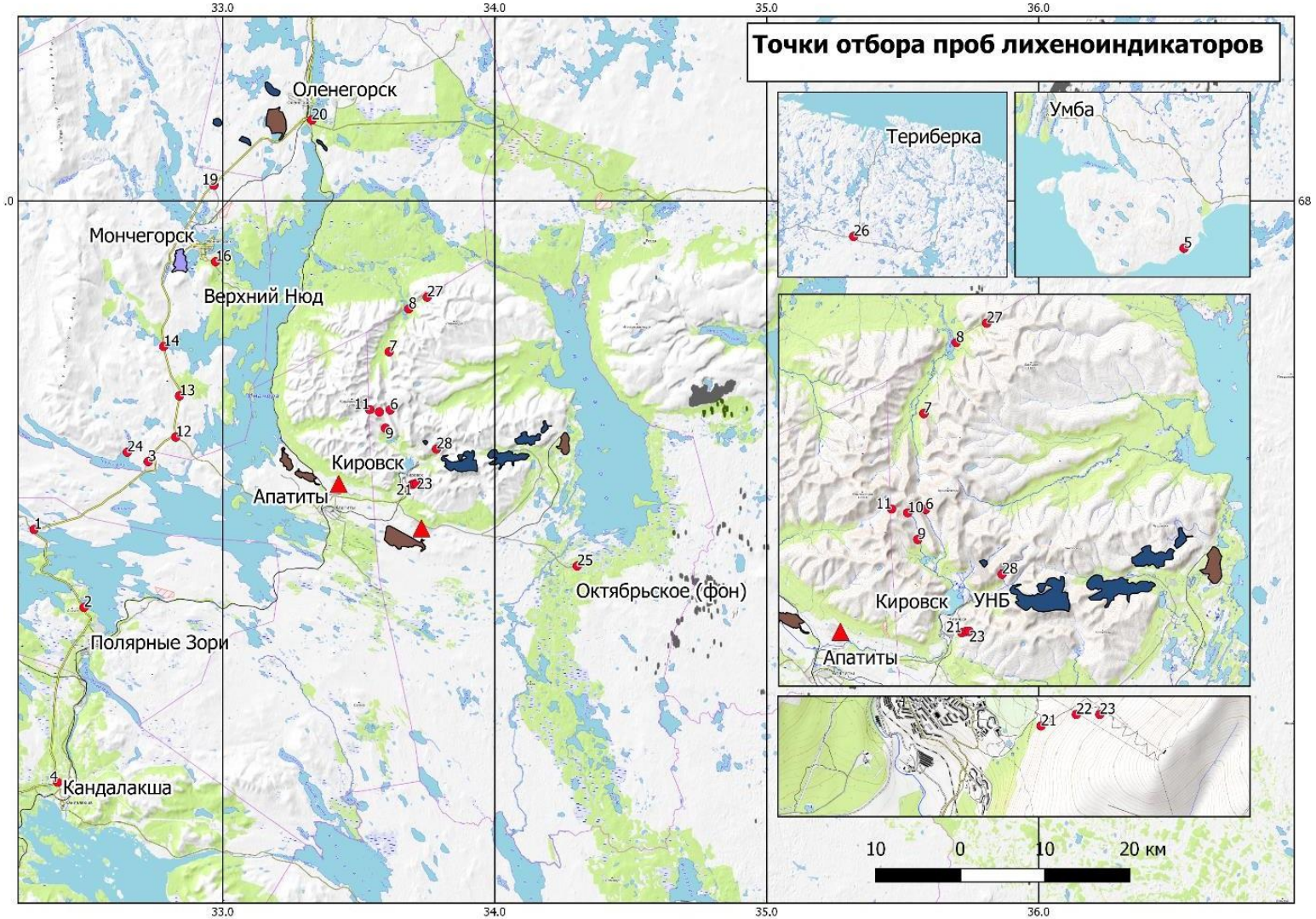

Рис. 2. Точки отбора проб лихеноиндикаторов.

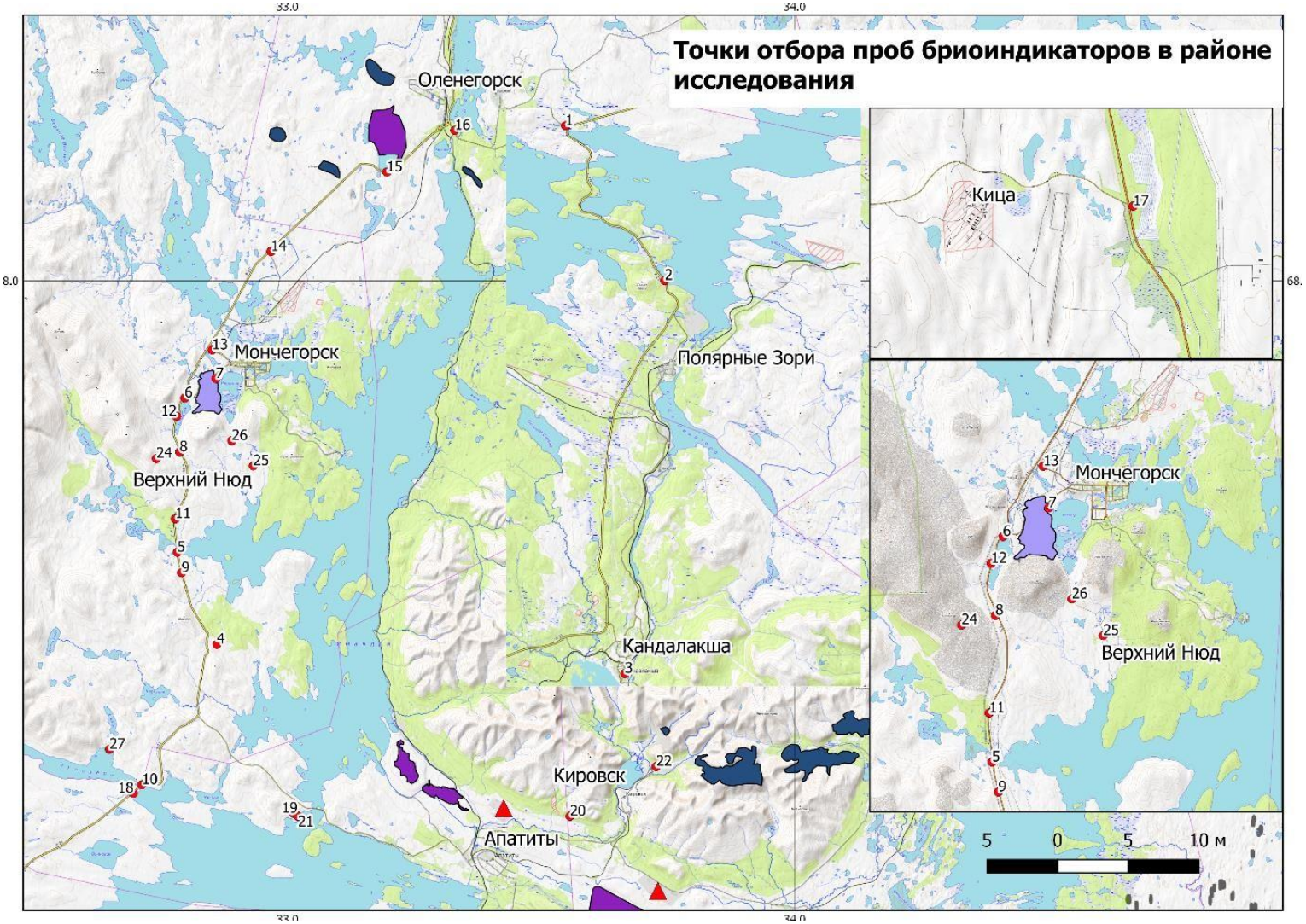

Рис. 3. Точки отбора проб брioиндикаторов.

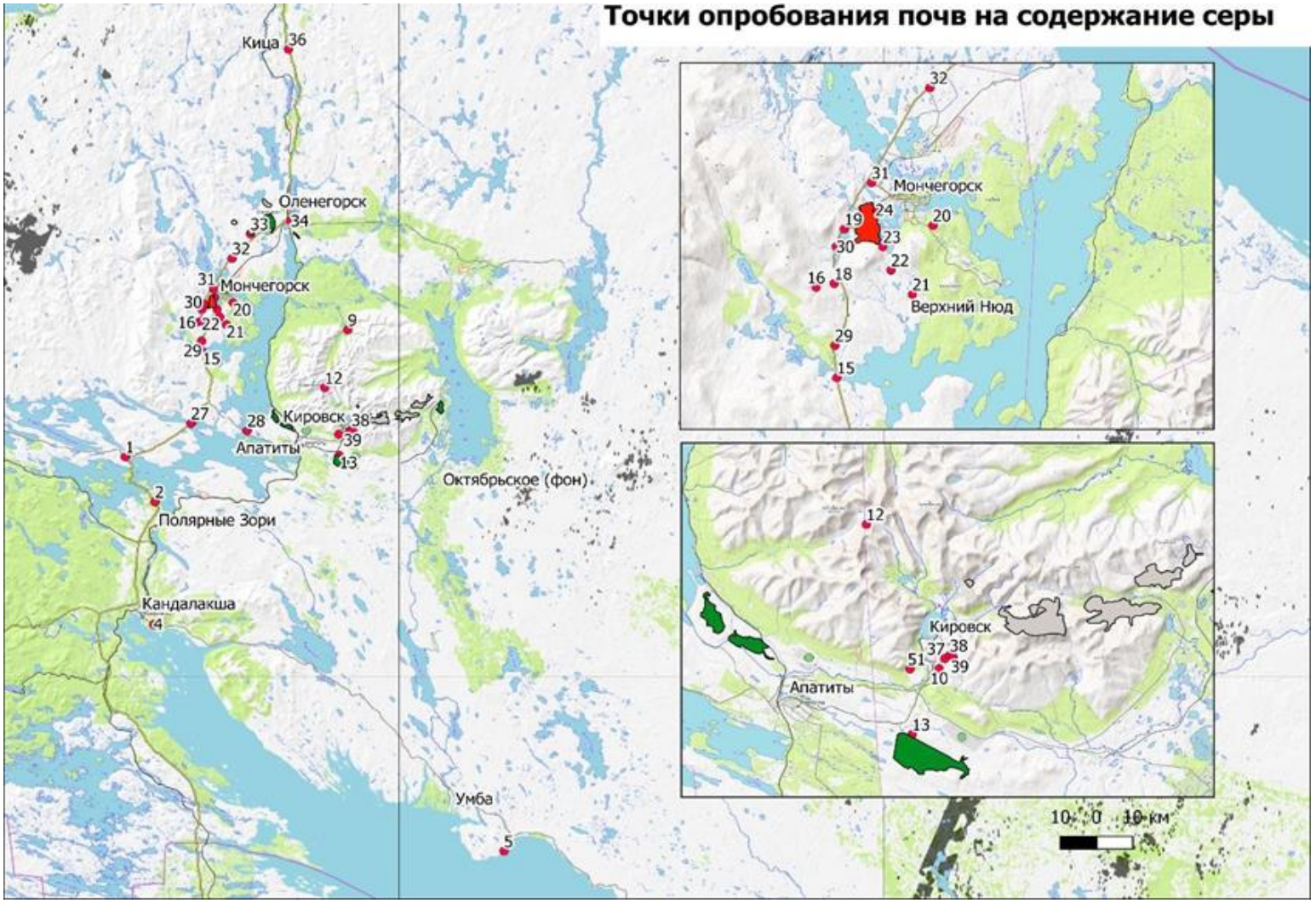

Рис. 4. Точки отбора проб верхнего горизонта почв.

В результате исследований, проводимых в центральной части Кольского полуострова, определены фоновые концентрации тяжелых металлов и стронция во мхах (*Sphagnum* sp.) и лишайниках (*Cladonia* sp.), которые представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1. Фоновые концентрации тяжелых металлов и стронция в *Cladonia* sp. и *Sphagnum* sp., мг/кг.

Индикатор	**Географические координаты**		**Cu**	**Ni**	**Sr**
	X_TYPE	Y_TYPE			
Cladonia sp.	34.302484° в.д.	67.491418° с.ш.	1	0.3	0.9
Sphagnum sp.			2.5	2	7.6

Таблица 2. Содержание элементов в пробах лишайников, мг/кг.

№	**Cu**	**Ni**	**Sr**
1	4.7	3.6	0.2
2	2.5	2.8	4
3	6.8	10.5	1.1
4	1.9	2	0.4
5	1	0.6	0.4
6	4.7	3.6	0.2
7	2.5	2.8	4
8	3.9	2.8	2.8
9	2.9	2.6	17.8
10	3	1.9	20.2
11	2.5	3.7	59.3
12	21.5	16.3	0.3
13	39.4	49.8	0.2
14	55.2	46.7	0.2
15	21.7	52.3	3.6
16	39.4	42.5	0.5
17	6.6	3.7	0.9
18	2.1	1	1.2
19	1.6	2	15
20	1.4	0.8	18.1
21	25.3	21.6	0.1
22	1	0.3	0.9
23	1.5	0.6	0.3
24	3.4	7.4	11.8
25	1.9	0.8	16.4
26	27.2	50.5	4.8
27	58	55	1.4

Таблица 3. Содержание элементов в пробах мха, мг/кг.

№	**Cu**	**Ni**	**Sr**
1	2.9	3.1	4.3
2	5.2	5.4	8
3	3.2	4.5	5.3
4	8.6	9.1	4.3
5	4.7	9.6	6
6	615	900	1.5
7	565	286	3.2
8	240	463	3
9	3.1	11.1	4.7
10	6.2	9.1	10
11	2.6	2.5	6
12	876	1680	22
13	2450	1060	1.6
14	27.3	73	4.6
15	4.5	9.6	5.8
16	3.6	5.2	4.7
17	2.40	1.80	4.50
18	5.6	7.2	6.5
19	8.7	8.7	6.6
20	76.6	160	1.8
21	6.7	13.1	7.2
22	4.4	2.3	14.8
23	3	2.3	5.2
24	284	277	11.7
25	38.4	39	23.6
26	16.1	280	0.6
27	16.4	26.1	1.4

Все отобранные пробы растительных образцов после очистки, высушивания и определения видового состава обрабатывались методом атомно-абсорбционной спектрометрии с автоматизацией в пламени. Погрешность определения в данном методе составляет от 15 до 30% (Мицык и др., 1990).

Для определения присутствия соединений серы в почвенном покрове была использована немецкая методика с применением бутанола и роданистого калия (KCNS), которая ранее нами использовалась успешно в этом районе (Евсеев, Красовская, 1996). По насыщенности цвета делался вывод о присутствии соединений серы (8 ppm насыщенно красный – высокий показатель). Результаты измерения содержания серы в почвах показаны в таблице 4 и были использованы для создания соответствующих карт содержания серы и диоксида серы в почвах региона исследований.

Эти данные использовались как в первоначальном виде, так и при подсчете геохимических коэффициентов. По ним были произведены расчеты коэффициента концентрации (Кс). По результатам анализа были составлены карты коэффициента концентрации. Полученные данные были сопоставлены с фоновыми значениями накопления тяжелых металлов и стронция.

Таблица 4. Содержание серы в верхнем горизонте почв, ppm.

№ пробы	ppm	№	ppm
1	<2.5	16	<2.5
2	<2.5	17	<2.5
3	<2.5	18	<2.5
4	3	19	2.7
5	6	20	<2.5
6	<2.5	21	3.5
7	3	22	5
8	<2.5	23	<2.5
9	<2.5	24	4.5
10	4	25	<2.5
11	2.6	26	2.7
12	<2.5	27	<2.5
13	<2.5	28	<2.5
14	4	29	<2.5
15	7	30	2.7

Результаты и обсуждение

Основное внимание мы уделили влиянию на компоненты природной среды комбината цветной металлургии, в выбросах которого преобладают диоксид серы и тяжелые металлы (Cu и Ni). В последние годы объемы выбросов в процессе модернизации производства значительно уменьшились и находятся в пределах до 50 тыс. т/год. Наиболее резко сократились выбросы диоксида серы. На основе полученных данных были построены карты коэффициентов концентрации никеля и меди (рис. 5-10) в лихено- и бриоиндикаторах. На рисунках 11 и 12 отражено содержания диоксида серы в верхнем горизонте почвы (ppm).

В радиусе 40 км от предприятия «Североникель» прослеживаются эллипсовидные зоны изменения природных геосистем. В непосредственной близости от комбината (3-5 км) расположена зона антропогенной пустоши, где был полностью уничтожен естественный растительный покров (северная тайга), сильно деградировали почвы (горизонт В выходит на поверхность), стерты различия высотных зон растительности на близлежащих хребтах-тундри. В этой зоне отсутствуют мхи и лишайники. Обнаружены лишь деградировавшие сфагновые торфяники, в которых отмечено сверхвысокое содержание никеля (Кс более 150) и меди (Кс более 20). Превышение по меди и никелю в бриоиндикаторах более 200. Также в этой зоне отмечено превышение содержания серы в верхнем горизонте почв, который находится в диапазоне от 4 до 7 ppm. В настоящее время в понижениях ландшафта начинает появляться подрост березы и ели, что можно связать с резким сокращением выбросов предприятия.

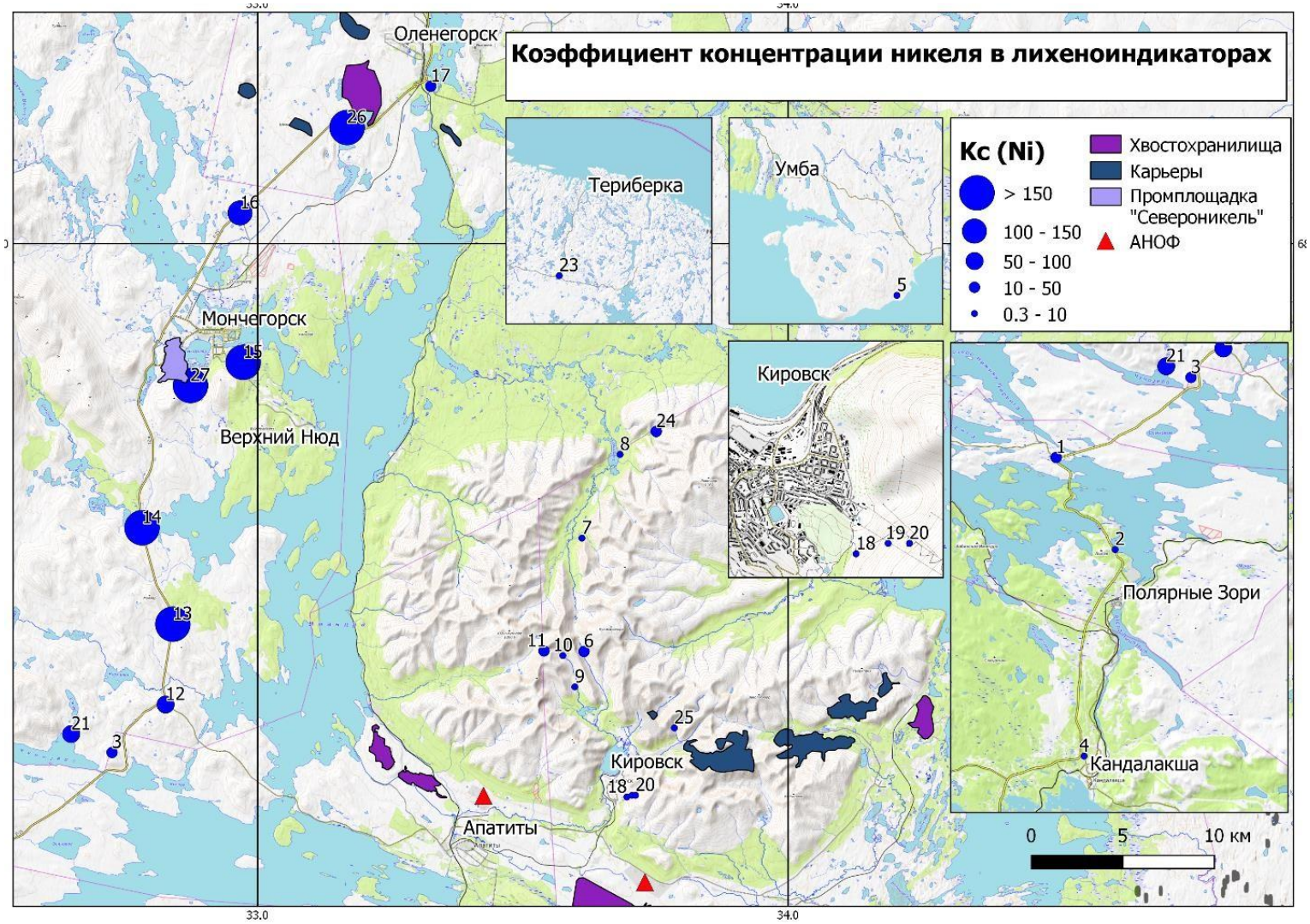

Рис. 5. Коэффициент концентрации никеля в лихеноиндикаторах.

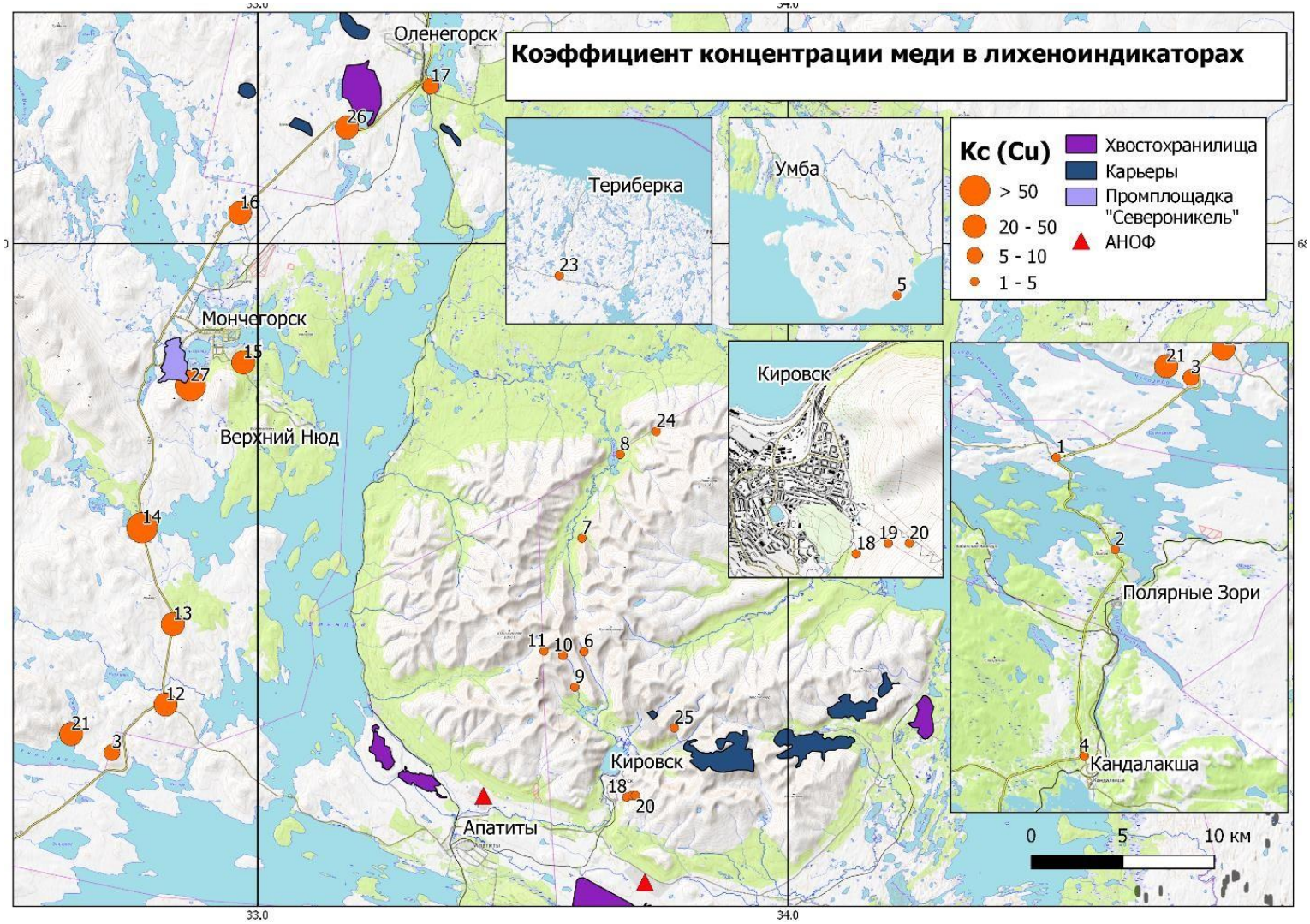

Рис. 6. Коэффициент концентрации меди в лихеноиндикаторах.

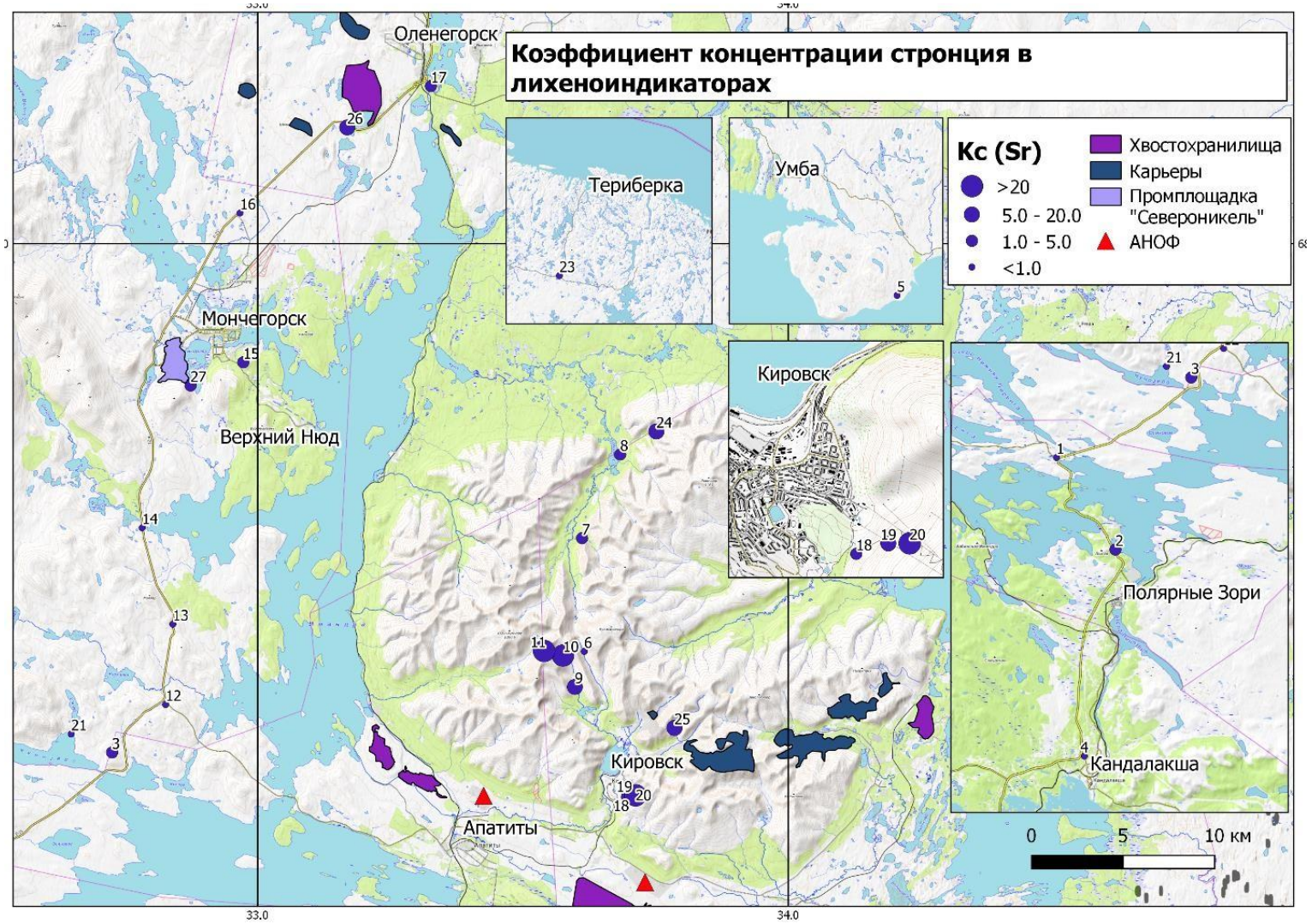

Рис. 7. Коэффициент концентрации стронция в лихеноиндикаторах.

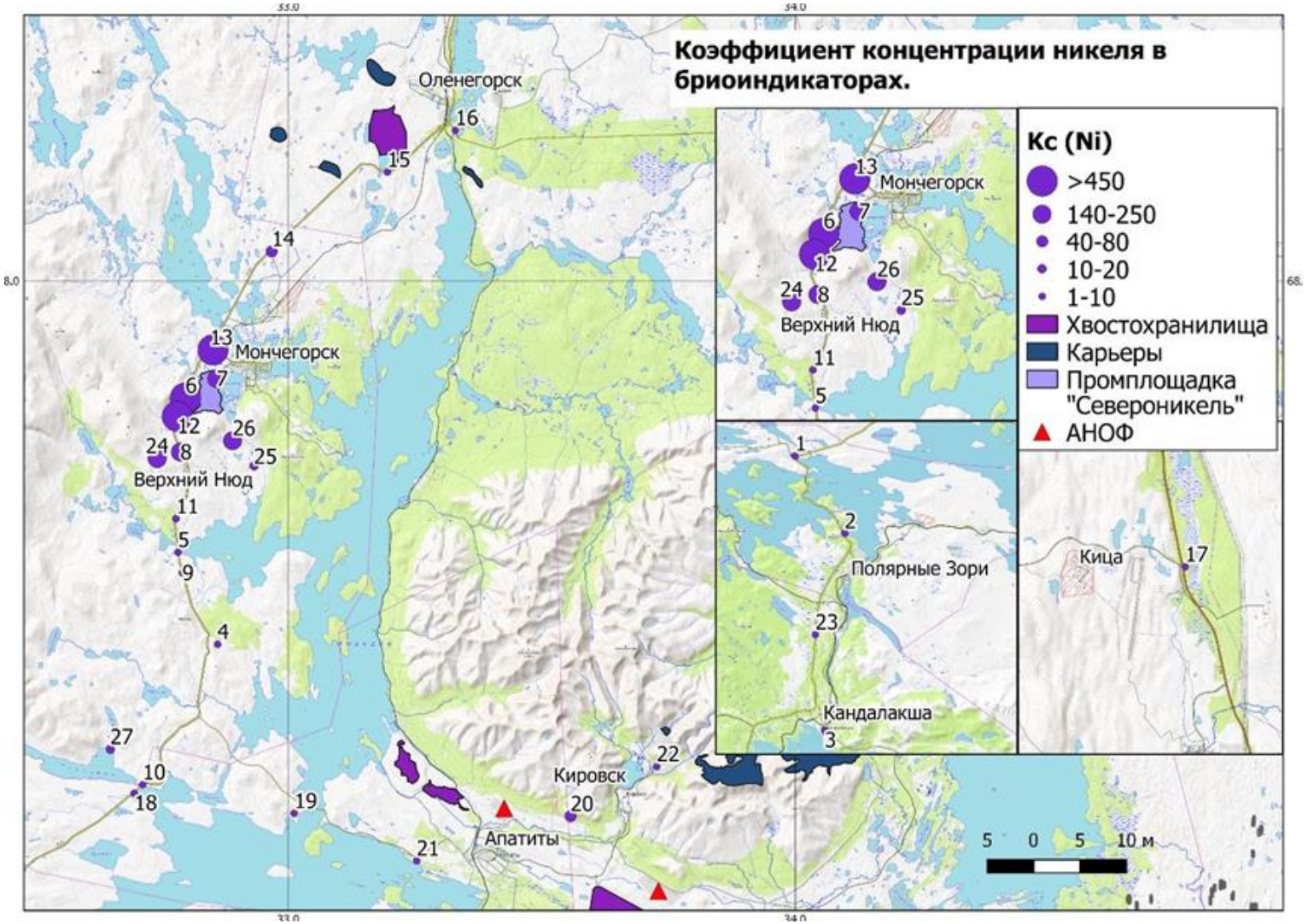

Рис. 8. Коэффициент концентрации никеля в брионндикаторах.

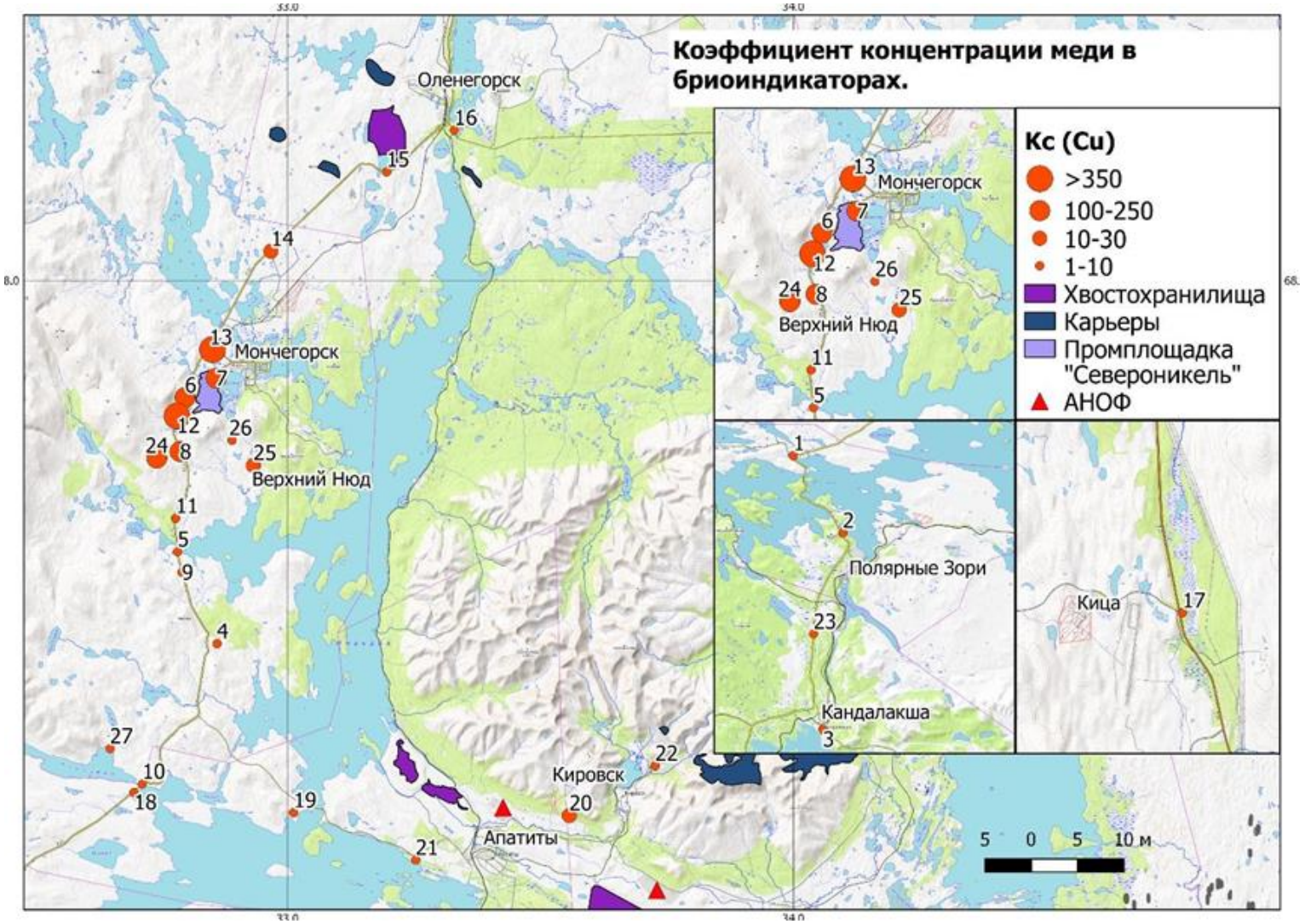

Рис. 9. Коэффициент концентрации меди в брионндикаторах.

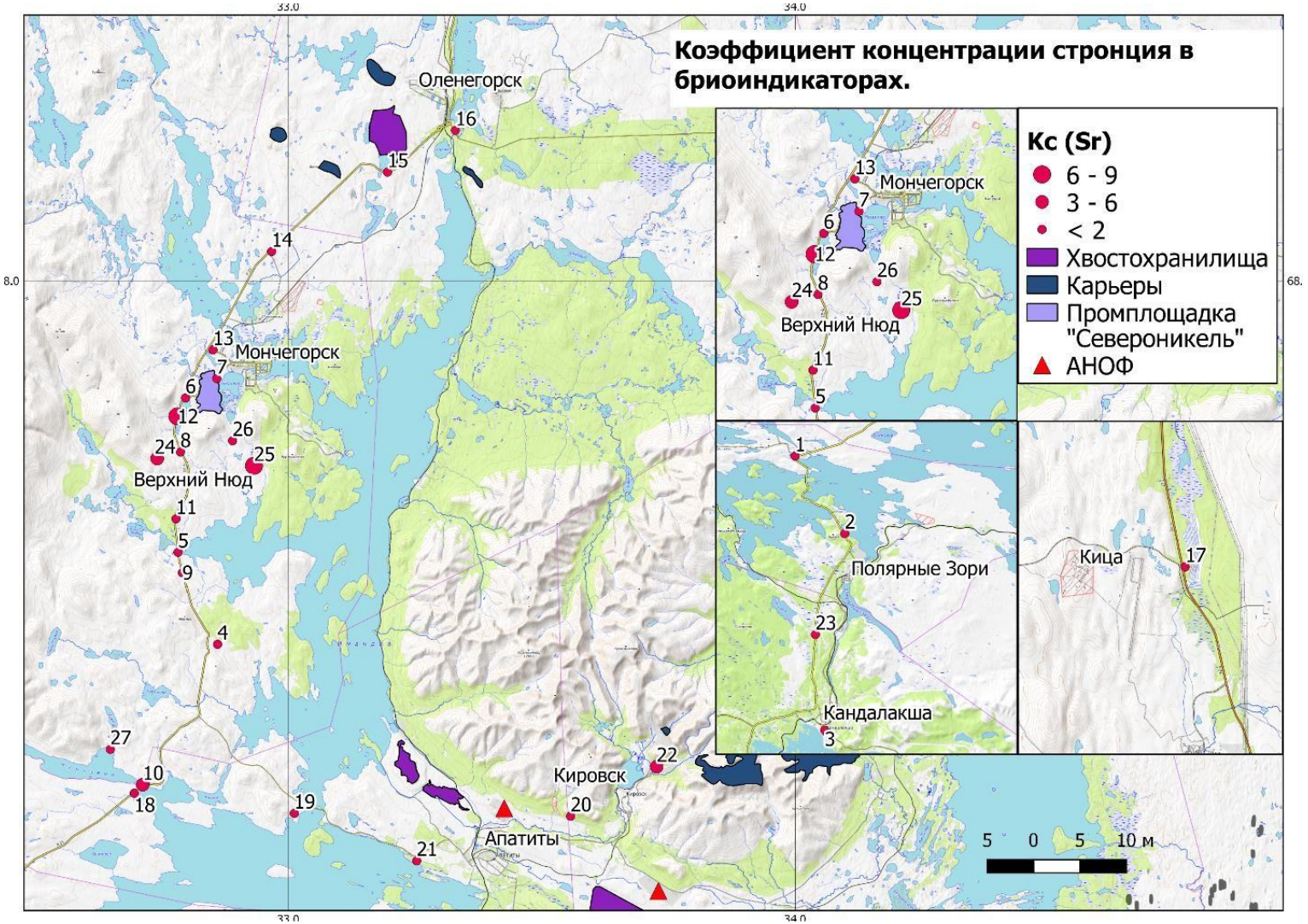

Рис. 10. Коэффициент концентрации стронция в бриоиндикаторах.

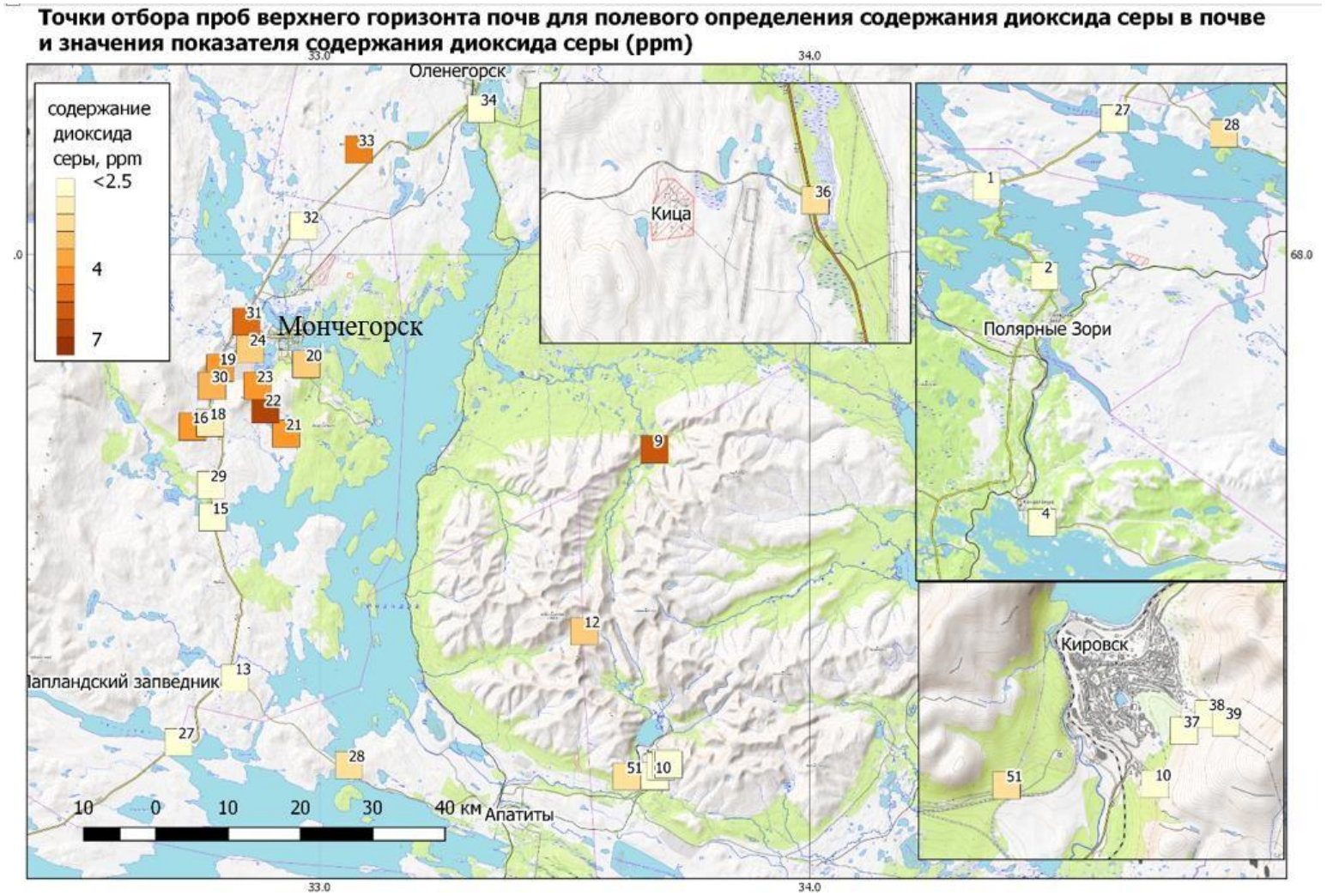

Рис. 11. Точки отбора проб верхнего горизонта почв для полевого определения содержания диоксида серы в почве и значения показателя содержания диоксида серы (ppm).

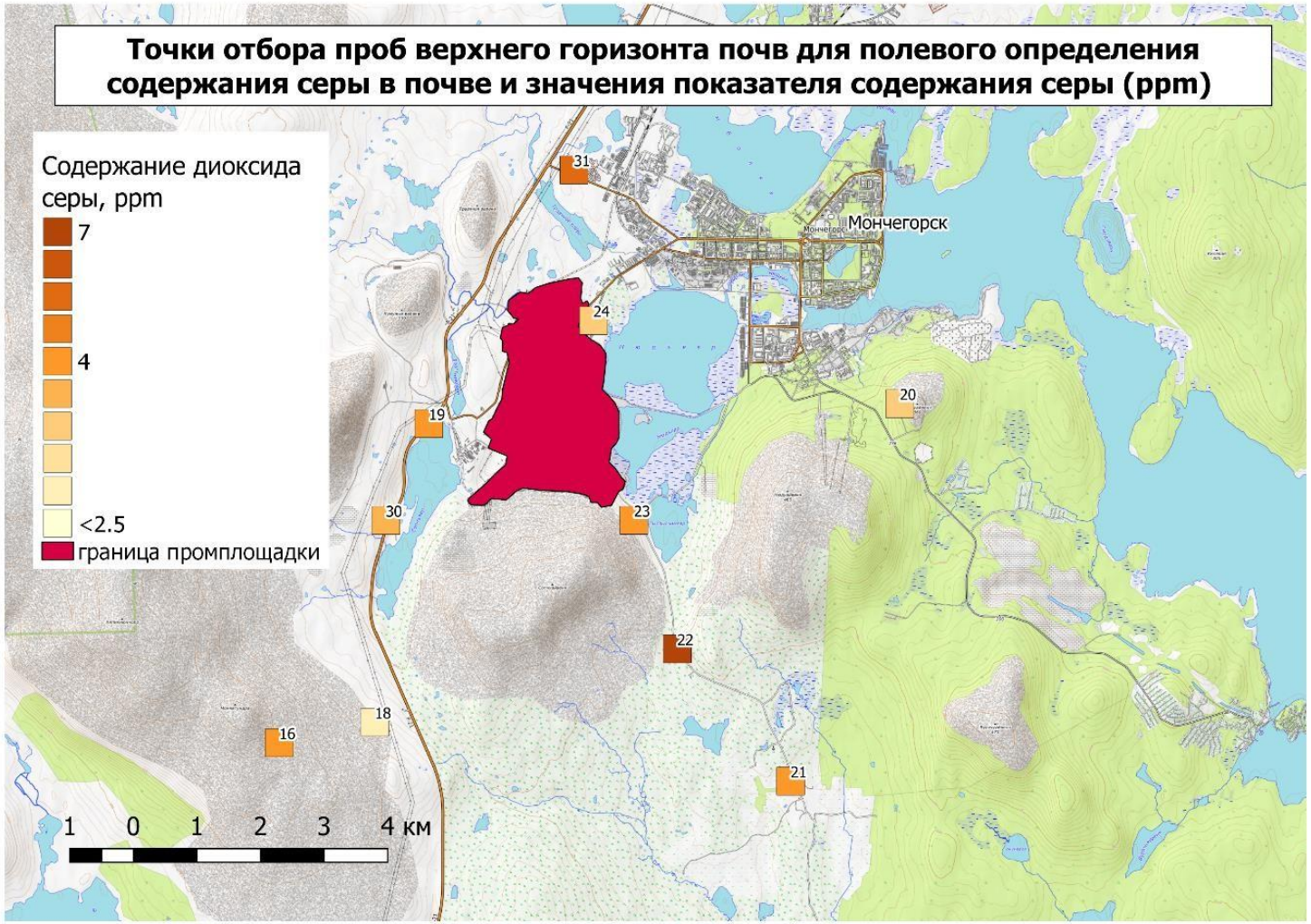

Рис. 12. Точки отбора проб верхнего горизонта почв для полевого определения содержания серы в почве и значения показателя содержания серы (ppm).

Фото 2. Озоление проб мхов и лишайников (фото Х.С. Султыговой).

В зоне прогрессирующих изменений (5-10 км) появляются древесные породы – ивы, березы, хвойная растительность; наземный растительный покров смыкается, однако в нем отсутствуют чувствительные к загрязнению виды растений (черника, лишайники, сфагновые мхи). Древесные породы в зоне прогрессирующих изменений характеризуются наличием некроза хвои и листьев, повышением сухостоя и ослаблением подроста. В отобранных пробах отмечено повышенное содержание меди (Кс до 113.6) и никеля (Кс до 168.3). Коэффициент концентрации по меди и никелю в бриоиндикаторах достигает значений более 113 и 138 соответственно, по стронцию не более 4. Стоит отметить, что в ближайших 10 км от комбината в точках опробования концентрация диоксида серы составляет от 3 до 7 ppm. Вне 10 км зоны редко встречаются пробы с содержанием соединений серы выше 2.5 ppm.

В зоне умеренных изменений (10-25 км) восстановлен моховолишайниковый покров (фото 2). Также сохраняются признаки воздействия на экосистемы комбината «Северонкель» (суховершинность, хлороз, некроз). В зоне начальных изменений (от 25 км от комбината и далее) в настоящее время редко наблюдается суховершинность и иные признаки негативного воздействия. Кс в лихеноинликаторах в пределах 2-10 (низкий). Коэффициент концентрации элементов по бриоиндикаторам от 1.2 до 7.

В 30 км на север от комбината «Североникель» отмечен коэффициент концентрации в лихеноиндикаторах 6.6 по меди и 12.3 по никелю. По стронцию не наблюдается Кс выше 3. На юг от источника загрязнения в точках 3 и 21, которые находятся в районе Лапландского заповедника, отмечено превышение по меди в 6 и 25 раз, по никелю – в 12 и 72. Такая разница концентрации объясняется тем, что точка 3 располагается за орографическим барьером, а коэффициент стронция не выше 3. В биоиндикаторах превышение Кс по меди в 7 раз и по никелю в 13 раз отмечены в Лапландском заповеднике (точка 27). Во всех остальных точках опробывания отмечены следующие диапазоны Кс: по меди – от 2.2 до 3.5, по никелю – 3.6-6.5, по стронцию – 2.4-3.7.

Пробы в 40 км зоне влияния от комбината «Североникель» очень редко фиксируют превышение по тяжелым металлам, но имеют высокий Кс по стронцию, что позволяет выделить

территорию городов Хибины, Кировск и Апатиты во II тип зоны воздействия. Здесь наблюдается высокая запыленность из-за взрывных работ на рудниках и хвостохранилищах компании АО «Апатит». Пылеватые частицы содержат высокие концентрации стронция в лихеноиндикаторах, которые были зафиксированы в пробах (Кс до 20). За пределами 40 км зоны по бриоиндикаторам не отмечено высоких показателей коэффициента концентрации по элементам (Кс от 1 до 5.5), однако в точке 22 фиксируется влияние комбината «Североникель». Кс по меди – 30.6, по никелю – 80. Отмечено повышенное содержание стронция в точке 22 (г. Кировск), где Кс составляет 5.5.

Аэротехногенные выбросы негативно отражаются на здоровье местного населения. В районе исследования основной причиной смертности населения в районе исследования являются заболевания органов кровообращения (Душкова, Евсеев, 2010). Помимо этого, заболевания органов дыхания и уровская болезнь почти в 4 раза превышают среднероссийские показатели, новообразования, в том числе злокачественные, так же выше среднего по России. В основном причиной, способствующей их появлению, является загрязнение тяжелыми металлами и стронцием (Душкова, Евсеев, 2011).

Заключение

В рамках данной работы были проведены комплексные эколого-географические и эколого-геохимические исследования в центральной части Кольского полуострова.

За длительный период (с 1930 г.) воздействия на компоненты природной среды горнодобывающей и горно-металлургической промышленности на территории центральной части Кольского полуострова сформировался Центрально-Кольский импактный район. В нем выделяются 2 типа зон повышенного воздействия.

Первый тип формирует комбинат «Североникель». В его окрестностях на протяжении многих лет наблюдается наиболее острая экологическая ситуация, которая возникла в результате интенсивных выбросов аэротехногенных поллютантов (преимущественно ряда тяжелых металлов и соединений серы).

По данным бриоиндикационных исследований, границы сильного воздействия комбината находятся в 15 км на север (превышение фоновых концентраций по меди в 10 раз, по никелю – в 36 раз, по свинцу – в 5 раз) и в 10 км на юг (превышение по меди в 15, по никелю – в 19 раз выше фоновых значений) от комбината. По данным лихеноиндикационных исследований зона повышенного поступления техногенных поллютантов заканчивается в 30 км от комбината на север (превышение фоновых значений по меди в 6 раз, по никелю – в 12, по свинцу – в 8) и в 50 км от комбината на юг (превышение фоновых значений по меди в 5 раз, по никелю – в 12).

При использовании метода коррелирования (расчет отношения Cu/Ni) в пробах мха почти во всех точках значения оказываются менее единицы, что позволяет сделать вывод о том, что в период проведения лихено- и бриоиндикационных исследований, в выбросах комбината «Североникель» преобладали соединения никеля. Также это подтверждает, что все выбросы были из одного источника.

Результаты исследований проб мхов, лишайников, почв позволяют сделать вывод о сокращении зоны загрязнения окружающей природной среды от комбината «Североникель». Проявилась начальная стадия восстановления растительности в зоне техногенной пустоши.

Для зоны воздействия II типа, который сформировали горнодобывающие и горно-обогатительные предприятия АО «Апатит», характерны механические нарушения почвенного покрова и грунтов карьерами, отвалами пустой породы и т.д. Загрязнение природной среды этого типа происходит за счет более крупных пылевых частиц, а не дисперсных микрочастиц, как в зоне предприятий горно-металлургической

промышленности. Пылеватые частицы, которые попадают на почвенный покров и растительность, в большом количестве поступают в окружающую среду с предприятий апатитонефелиновых фабрик АО «Апатит» и хвостохранилищ. В пробах мхов и лишайников превышения по содержанию стронция более чем в 20 раз по сравнению с фоном отмечены в районе Хибинского массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анищенко Л.Н., Шапурко В.Н., Сафранкова Е.А. 2014. Особенности аккумуляции тяжелых металлов растениями и лишайниками в условиях сочетанной антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. С. 1527-1531.

Бейзель Н.Ф. 2008. Атомно-адсорбционная спектрометрия: Учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный университет. 72 с.

Душкова Д.О., Евсеев А.В. 2011. Экология и здоровье человека: региональные исследования на европейском Севере. М.: Географический факультет МГУ. 192 с.

Душкова Д.О., Евсеев А.В. 2010. Здоровье населения фонового и импактных районов Кольского полуострова // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (4-8 октября 2010 г.). Апатиты. С. 85-89.

Евсеев А.В., Красовская Т.М. 1997. Закономерности формирования импактных зон в Арктике и Субарктике России // География и природные ресурсы. № 4. С. 19-24.

Евсеев А.В., Красовская Т.М. 1990. Рациональное природопользование на Кольском полуострове: Учебное пособие по дальней практике. М: Изд-во Московского университета. 89 с.

Евсеев А.В., Красовская Т.М. 1996. Эколого-географические особенности природной среды районов Крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во СГУ. 232 с.

Кнуняц И.Л. 1988. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 623 с.

Мицык Е.П., Хватова Ю.С., Дунаев А.М. 1990. Методика оценки воздействия тяжелых металлов на особо охраняемые природные территории с помощью биомониторинга. М. С. 74-78.

Опекунова М.Г. 2016. Биоиндикация загрязнений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета. 300 с.

РД 52.44.2-94. Методические указания. Охрана природы // Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой. 1995 [Электронный ресурс http://docs.cntd.ru/document/1200034752 (дата обращения 10.04.2019)].

Ревич Б.А, Сает Ю.Е., Смирнова Ю. Е. 1990. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЖ. 16 с.

Сухарева Т.А. 2016. Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук». № 4. С. 70-82.

Топографическая карта Кольский п-в. Обзорная карта. 2019 [Электронный ресурс http://topmap.su/51/obzor.html (дата обращения 10.04.2019)].

Черненькова Т.В. 2002. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука. 191 с.