

III. Научные исследования в Арктике

УДК 504.054

Загрязнение почвенно-растительного комплекса в окрестностях рудника «Баренцбург» полициклическими ароматическими углеводородами

Б.Н. Демин, кандидат технических наук,
А.П. Граевский, кандидат географических наук,
А.С. Демешкин, *С.В. Власов*
Северо-Западный филиал ФГБУ «НПО» «Тайфун»

Выполненные Северо-Западным филиалом ФГБУ «НПО» «Тайфун» в период 2002-2010 годов исследования уровней загрязнения почвенно-растительного покрова полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) в окрестностях поселка и действующего рудника Баренцбург позволили выявить особенности пространственно-временной изменчивости уровней их содержания в типичных представителях арктических растений - мхах и сосудистых растениях. Показано, что наиболее чувствительным индикатором аэрозольного загрязнения воздуха соединениями ПАУ является сообщество мхов с развитой поверхностью листьев и круглогодичным вегетационным периодом.

Выявлены основные источники поступления ПАУ в окружающую среду и оценен вклад выбросов угольной ТЭЦ в загрязнение почвенно-растительного покрова, уточнены границы зоны прямого техногенного воздействия инфраструктуры поселка. На основании анализа фактической ситуации в регионе показано, что существующая сеть фоновых станций лишь частично охватывает эту зону, даны рекомендации по оптимизации сети станций фонового мониторинга.

Введение

Рудник в пос. Баренцбург на архипелаге Шпицберген – это пример типичного арктического угледобывающего предприятия. Современные промышленные запасы рудника составляют почти 2 млн. тонн. Уголь залегают на глубине около 700 м в два рабочих пласта (верхний и нижний) с полезной мощностью 0.6–1.4 м; расстояние между пластами составляет около 30 м [1]. Ежегодная добыча угля — до 120 тыс. тонн. Помимо подземных горных

выработок инфраструктура рудника включает в себя крупный рабочий посёлок, морской порт со своим флотом и углепогрузочным комплексом, различные подсобные цеха и хозяйства, радиоцентр, угольную ТЭЦ, наземный и вертолётный транспорт, строительные участки, склады продукции и многое другое.

В период 2002–2010 годов Северо-Западный филиал ФГБУ «НПО» «Тайфун» исследовал уровни загрязнения растительного покрова в окрестностях рудника «Баренцбург» в рамках программы Росгидромета по комплексному экологическому

мониторингу, что позволило выявить некоторые особенности распределения различных загрязняющих веществ (ЗВ) в арктической растительности этого региона. В настоящей статье на примере мхов и сосудистых растений рассмотрены особенности формирования и изменчивость уровней загрязнения растительного покрова полициклическими ароматическими углеводородами.

Токсикологические исследования позволили обозначить соединения группы ПАУ, которые необходимо постоянно контролировать в окружающей среде как с точки зрения их собственной токсичности, так и с точки зрения наиболее вероятного поступления в окружающую среду. Агентство по охране окружающей среды США (EPA US) рекомендует нормировать и контролировать содержание всех 16-ти приоритетных ПАУ в объектах окружающей среды. Нормы, разрабатываемые в рамках ISO и ЕС, предполагают дополнительное расширение перечня определяемых соединений. Следует отметить, что в России в настоящее время в водах и почвах нормируется содержание только одного соединения этого класса – бенз(а)пирена.

Источники загрязняющих веществ и факторы, влияющие на загрязнение

Уровень загрязнения почвенно-растительного покрова зависит от многих факторов, в том числе от типа почв и видовой принадлежности растений, миграционных способностей токсикантов, рельефа местности, розы ветров, мощности источников загрязнения и т.д. Роль ветрового переноса токсикантов в виде атмосферных аэрозолей в формировании уровней загрязнения почвенно-растительного комплекса и других элементов биогеоценоза подробно рассмотрена в сборнике «Аэрозоли Сибири» (под ред. К.П. Куценого) [5] и других работах [4, 12].

Рудник Баренцбург и элементы его инфраструктуры расположены на прибрежной береговой террасе залива Гренфьорд и с востока ограничены грядой гор высотой до 200–500 метров. В заливе Гренфьорд в течение большей части года преобладают юго-восточные и южные ветры, а в июле и августе – северные и северо-западные. Многолетний характер преобладающих ветров в районе Баренцбурга представлен на *рис. 1*.

Основными местными источниками загрязнения в окрестностях Баренцбурга являются работающая на местном высокосернистом угле ТЭЦ; отвалы горных пород рудника и обогатительной фабрики; золоотвалы ТЭЦ; склады стройматериалов; свалки бытового мусора; вертолетная площадка со своей

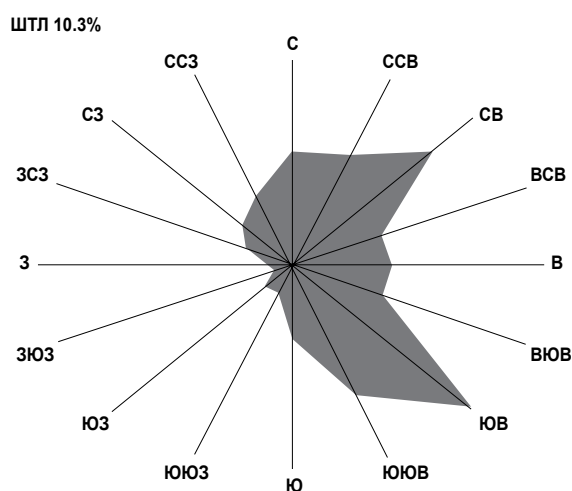


Рис. 1
Повторяемость направлений ветра в пос. Баренцбург

автономной котельной, складами ГСМ и ремонтными мастерскими; портовый комплекс с межнавигационным складом хранения угля; автомобильный транспорт; площадки хранения коммунально-бытовых отходов и производственные стоки.

Приземный слой атмосферного воздуха в районе поселка в значительной степени подвержен загрязнению местными источниками выбросов в атмосферу пыли, газа, а также золы от работающей ТЭЦ. Кроме того, значительные объемы крупно-дисперсионной пыли поступают в атмосферу от вентиляции шахты, от узкоколейной железной дороги при перемещении по ней вагонеток с углем, от угольных складов при погрузо-разгрузочных работах и от перемещения отвалов пустой породы, при аварийных возгораниях в шахтах и отвалах. Непосредственным источником загрязнения почв и растительного покрова в районе полярного рудника являются газовые и пылевые выбросы в атмосферу, содержащие в своем составе осаждающиеся на почвенный покров взвешенные пылевые частицы, на которых сорбируется большинство токсичных соединений (тяжелые металлы, нефтепродукты, ХОС, ПАУ, в том числе бенз(а)пирен и др.), а также ветровой раздув золоотвалов. Почвы и растительность загрязняются также шахтными водами при сбросе их на ландшафты, при инфильтрации сточных вод из золоотвалов ТЭЦ, и т.д.

Помимо местных источников, на загрязнение почвенного и растительного покрова рудника оказывают воздействие и удаленные источники за счет трансграничного переноса. Загрязняющие вещества, попадающие в атмосферу в регионах промышленной активности, могут сорбироваться на поверхности атмосферных аэрозольных частиц, образовывать

собственные твердые микроконгломераты или находиться в атмосферном воздухе в газообразном состоянии. Они переносятся на значительные расстояния и могут вносить существенный вклад в загрязнение удаленных районов.

Уровни содержания загрязняющих веществ в растительном покрове изучаемого региона изменяются в зависимости от видовой принадлежности растений. Содержание ЗВ во мхах, вследствие отсутствия у них развитой корневой системы, в значительной степени зависит от химического состава атмосферных осадков и от морфологических особенностей отдельных видов мхов (от площади поверхности листьев и их шероховатости, опушенности, содержания воскоподобных веществ). Помимо этого, в силу своего приземного расположения, а также благодаря большей по сравнению с сосудистыми растениями поверхности мхи способны аккумулировать большое количество пыли и атмосферных аэрозолей, состав которых также влияет на уровень их загрязнения. Отсутствие у мхов корневой системы и преобладание аэриального поступления веществ в процессе питания позволяет считать их аккумуляторами атмосферных аэрозолей, содержащих загрязняющие вещества и использовать их в качестве индикаторов атмосферного загрязнения [4, 5]. Концентрации загрязняющих веществ в сосудистых растениях, имеющих развитую корневую систему и, по сравнению со мхами, меньшую площадь поверхности листьев, менее зависимы от загрязнения атмосферного воздуха и осадков. Большее влияние на загрязнение сосудистых растений оказывает загрязненность почв, на которых они произрастают, и питающих их почвенных вод.

По данным российских исследований [2], химический состав, как мхов, так и сосудистых растений обусловлен сильным влиянием пыли. Высокая запыленность атмосферного воздуха на архипелаге Шпицберген в летний период объясняется наличием грунтов с редкой или вовсе отсутствующей растительностью и сильными ветрами, вызывающими значительную эрозию горных пород.

Полициклические ароматические углеводороды

Среди органических веществ, загрязняющих атмосферу, почвы, растительный покров и природные воды, особое место занимают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Многие из этих соединений относятся к супер-экоотоксикантам 1-го класса опасности, поскольку обладают мутагенными и канцерогенными свойствами и обладают способностью накапливаться в природных объектах.

ПАУ образуются в процессах неполного сгорания нефтепродуктов, угля, дерева, мусора, бытовых отходов, при этом, чем ниже температура в устройстве для сжигания, тем больше образуется ПАУ. В атмосфере ПАУ образуют собственные аэрозольные дисперсии, либо адсорбируются на твердых аэрозольных частицах. Размеры частиц в значительной степени определяют дальнейшее поведение ПАУ, их транспорт воздушными массами в направлении доминирующих ветров и осаждение из атмосферного воздуха.

При комнатной температуре все ПАУ — твердые кристаллические вещества, давление их насыщенных паров очень мало. При охлаждении горячих газов, содержащих ПАУ, эти вещества конденсируются и оседают в зоне выбросов. На расстоянии нескольких километров от угольной ТЭЦ поверхность почвы обычно сильно загрязнена ПАУ, однако большая часть ПАУ уносится на дальние расстояния в виде аэрозолей на микрочастицах сажи.

ТЭЦ в пос. Баренцбург, работающая на местном угле является основным поставщиком ПАУ в приземный слой атмосферы района наблюдений. Ряд других локальных источников, расположенных в окрестности поселка (отвалы горных пород угольной шахты, на которых регулярно отмечается самовозгорание, наземный и вертолетный транспорт), также вносят свой вклад в поступление ПАУ.

Методика работ

Для изучения уровней загрязнения растительного покрова в районе рудника и прилегающей местности была организована опорная сеть пробных площадок, включающая в себя локальный полигон, охватывающий пос. Баренцбург с инфраструктурой рудника (включая вертолетную площадку, отвалы пород, склады и свалки), и фоновый полигон, в который вошли пробные площадки, расположенные в окрестностях поселка за пределами санитарно-защитной зоны поселка и рудника. Схема размещения пробных площадок в районе Баренцбурга представлена на *рис. 2*.

Для удобства последующего анализа было выделено восемь характерных районов, отличающихся удалением от поселка и рудника, высотным положением пробных площадок, наличием локальных источников загрязнения и расстоянием до побережья. В пределах каждого из районов проводилось обобщение данных, полученных в результате химико-аналитических исследований отобранных образцов растительности. Учитывая,

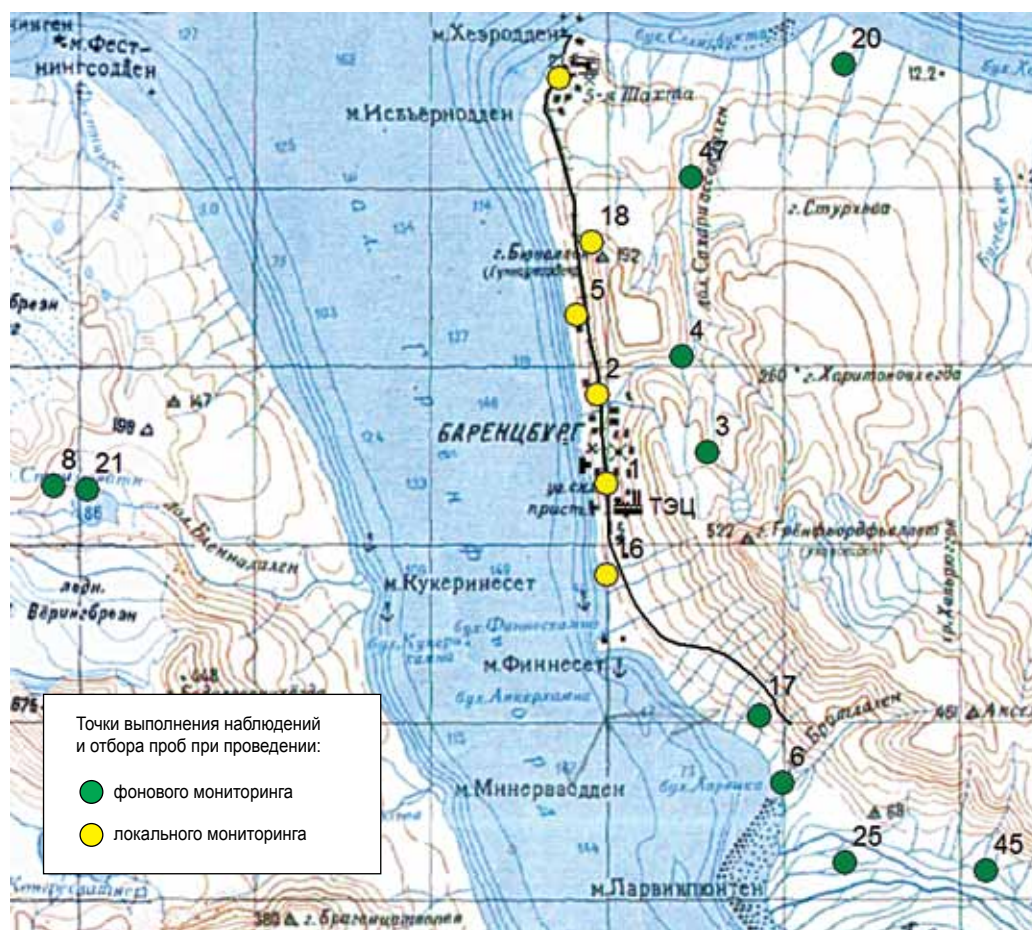


Рис. 2
Схема расположения площадок отбора образцов почвенно-растительного покрова при проведении фонового и локального экологического мониторинга в районе пос. Баренцбург

что доминирующим и постоянно действующим источником атмосферного загрязнения в поселке является ТЭЦ, именно от нее велся отсчет расстояния и определялся азимут выделяемых районов осреднения (табл. 1).

Результаты исследований

Для оценки характера загрязнения растительного покрова данные по содержанию ПАУ, полученные на всех пробных площадках локального и фонового полигонов, усреднялись за весь период наблюдений. Всего за летне-осенний период 2002–2010 годов было собрано более 200 образцов различных видов растительности. Для определения содержания ПАУ были взяты 98 образцов сосудистых растений, представленных в основном горцем живородящим (*Polygonum viviparum*) и камнеломкой (*Saxifraga sp.*), и 98 образцов мха, представленных в основном печеночниками (*Marchantiophyta*) и сфагнумом (*Sphagnum*).

Пробы растений были проанализированы в аккредитованной химико-аналитической лаборатории Северо-Западного филиала ФГБУ «НПО

«Тайфун» методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуоресцентным и спектральным или диодно-матричным детектированием. Образцы растительности последовательно экстрагировали метанолом и гексаном, экстракт упаривали на ротационном испарителе, концентрат очищали методом колоночной хроматографии на силикагеле и вновь упаривали. Суммарная неопределенность метода составляет не более 25%. Результаты анализов сведены в табл. 2.

Следует отметить, что средние арифметические значения содержания ПАУ в растительном покрове, полученные по выделенным районам, достаточно близки к значениям медианы, что указывает на хорошую репрезентативность выбранных площадок отбора образцов растений. Наибольшие различия этих показателей наблюдались в переходных районах, а именно, в долине реки Грендалсэльва и у озера Биенда-Стемме. Именно в этих районах загрязнение растительного покрова имеет очаговый характер и здесь наблюдаются наибольшие различия между минимальными и максимальными концентрациями ПАУ в образцах растительности.

Таблица 1

Расположение районов осреднения уровней содержания загрязняющих веществ

Район осреднения	Точки пробоотбора	азимут	Расстояние от ТЭЦ, км
1 – территория поселка	2 точки (ЗГМО и долина ручья у консульства)	С	0.5 и 1 км
	1 точка (бытовая свалка)	Ю	0.5 км
2 – окрестности поселка	2 точки (склады стройматериалов, металлоконструкций)	С	2.0–2.8 км
3 – переходный	1 точка (склон горы) 300 м над морем	ВСВ	1.0 км
	2 точка (склон горы) 200 м над морем	ССВ	1.8 км
4 – отвалы пород	1 точка	ЮВ	3.5 км
5 – река Грендалсэльва	3 точки (дельта, долина реки)	ЮЮВ, ЮВ	4.1 км 4.7 км
6 – аэродром	1 точка	С	5.3 км
7 – озеро Биенда-Стемме	2 точки	З	5.3 км
8 – северо-вост. район	2 точки	СВ	5.8-6.1

Таблица 2

Итоговые результаты содержания суммарного ПАУ (нг/г) в сосудистых растениях и мхах в районах осреднения за период 2002–2010 годов

Район (кол. проб)	Сосудистые			Мох		
	диапазон	медиана	\bar{X}	диапазон	медиана	\bar{X}
1 (8)	495–928	721	681	2350–5397	3776	3460
2 (5)	597–871	685	709	727–2367	1550	1576
3 (18)	24–937	206	335	65–1770	373	681
4 (14)	55–660	165	221	98–1518	308	510
5 (14)	24–642	64	164	43–1427	250	428
6 (6)	40–380	203	196	37–1118	429	458
7 (15)	11–286	56	87	3.0–815	140	202
8 (9)	26–241	83	93	31.4–1831	245	393

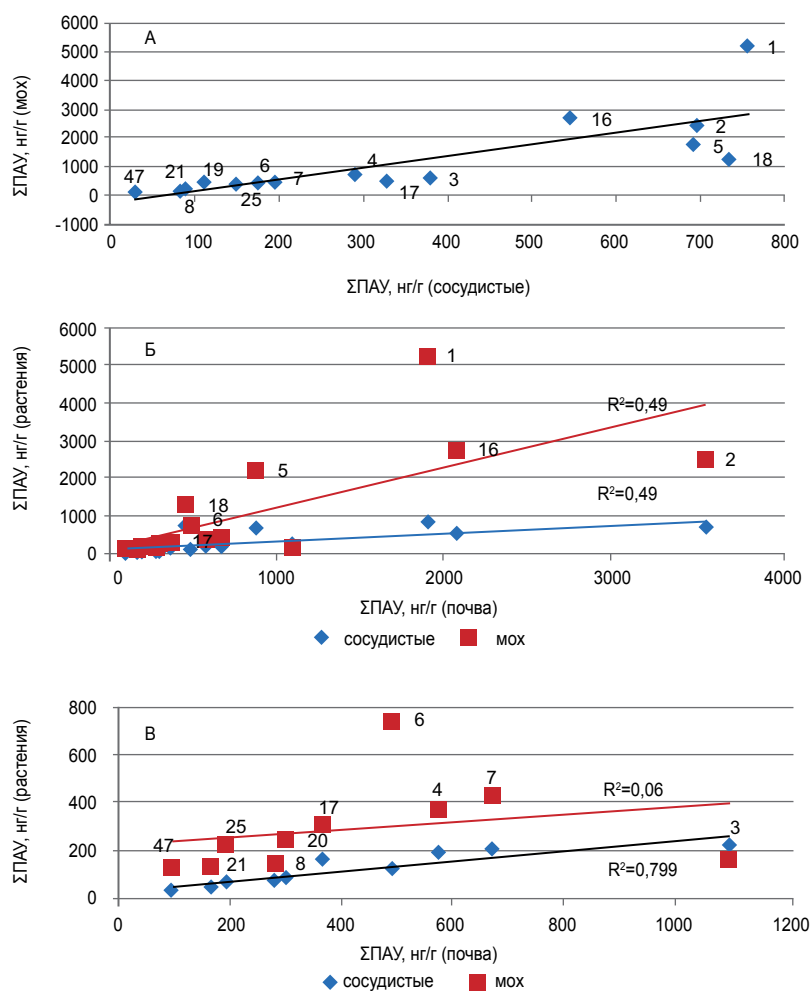


Рис. 3
 Корреляция содержания ΣПАУ во мхах и сосудистых растениях (а);
 концентрации ΣПАУ в растениях и в почвах для полной сети точек (б)
 и для точек фонового полигона (малые концентрации) (в)

Корреляция содержания ΣПАУ в образцах мха и в образцах сосудистых растений представлена на рис. 3-а. Коэффициент корреляции R равен 0,86, что указывает на четко выраженную связь между содержанием ПАУ в сосудистых растениях и мхах. Сами концентрации ПАУ в сосудистых растениях и мхах имеют значительные количественные отличия при весьма близких тенденциях их пространственного распределения. В пределах одних и тех же районов мониторинга массы поступающих в растительный покров ПАУ пропорциональны их содержанию в атмосферных осадках для обоих типов растительности. Разница в их количественном содержании объясняется различными механизмами усвоения, накопления, метаболизма и выведения загрязняющих веществ из растений, что в свою очередь обусловлено ботаническими свойствами растений и особенностями биохимических процессов, протекающими в них.

Максимальные концентрации ΣПАУ отмечаются в образцах растительности, отобранных в районе поселка и его окрестностей (точки 1, 2, 5, 16, 18).

Представляет интерес оценка корреляции уровней содержания ΣПАУ в растительности и в почвах (рис. 3-б). Взаимосвязь таких загрязнений для полной сети наблюдений проявляется не так четко, как взаимосвязь загрязнения мхов и сосудистых растений. Коэффициент корреляции в данном случае равен 0,7 и для мхов, и для сосудистых растений, но при этом обращает на себя внимание значительный разброс значений ΣПАУ во мхах и почве в пределах поселка (точки 1, 2, 16), что указывает на слабое влияние загрязненности почвы на уровень загрязнения мхов.

По сравнению со мхами, загрязненность сосудистых растений, имеющих развитую корневую систему, более тесно связана с загрязнением подстилающей почвы. Этот эффект особенно четко проявляется при невысоких уровнях загрязнения. Если рассматривать только точки фонового полигона, находящиеся за пределами санитарной зоны поселка (рис. 3в), между уровнями загрязнения мхов и почв не наблюдается практически никакой взаимозависимости ($R=0,25$), а для загрязнения сосудистых растений

и почвы коэффициент корреляции составляет 0,89.

Особенности распределения ПАУ в растениях и почвах по районам осреднения иллюстрирует лепестковая диаграмма, представленная на рис. 4. На диаграмме четко виден одинаковый характер распределения загрязнения растительного покрова в районах осреднения, в то время как загрязнение почвенного покрова отличается наличием выраженного увеличения загрязненности в переходном районе (район 3). Наиболее загрязненными являются растения, произрастающие в пределах поселка и окрестностях, где наиболее активно происходит осаждение сажевых и других аэрозольных частиц.

Загрязнение почвы ПАУ помимо самого поселка ощутимо и в переходном районе, расположенном на высотах 200–300 м в направлении господствующих северо-восточных ветров.

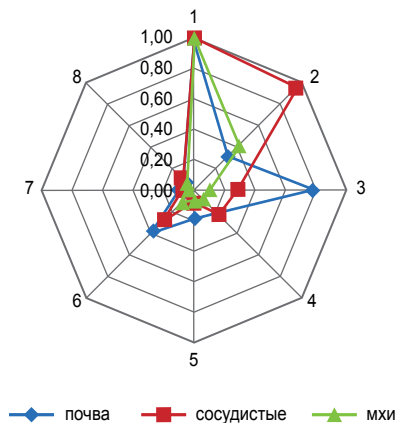


Рис. 4
Содержание ПАУ в растительности и почвах по выбранным районам осреднения, в долях от максимальной концентрации

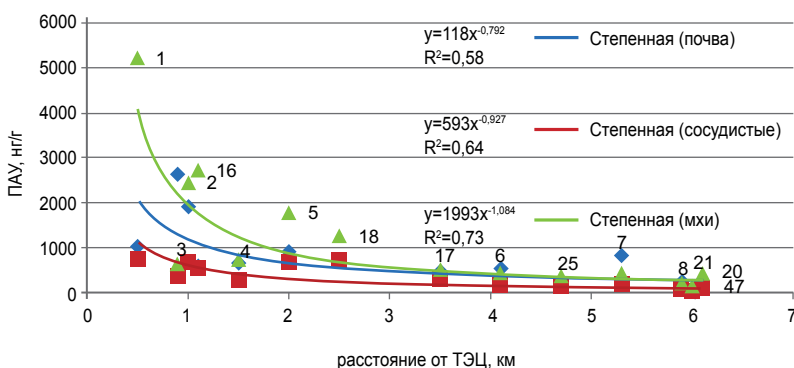


Рис. 5
Изменчивость концентрации Σ ПАУ в образцах сосудистых растений и мхов и пробах почв в зависимости от расстояния до ТЭЦ.

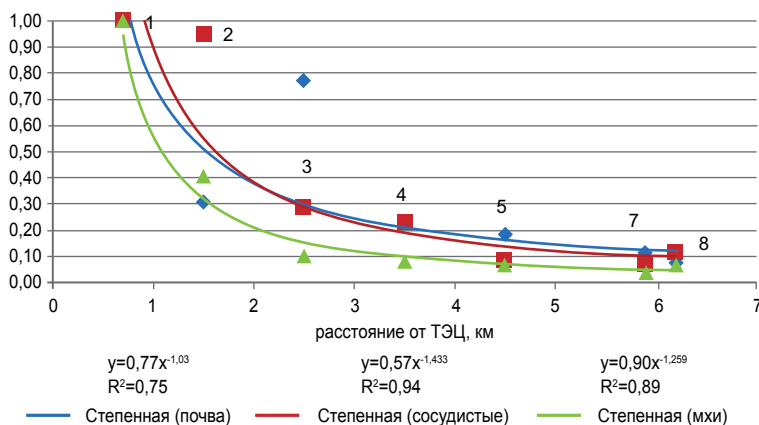


Рис. 6
График загрязненности почвенно-растительного покрова ПАУ в районах осреднения в зависимости от удаленности их от ТЭЦ

Фоновые районы (5, 7, 8) подвержены наименьшему загрязнению. В районе расположения вертолетной площадки (6), отмечается рост загрязненности почвенно-растительного покрова, обусловленный местными источниками, в первую очередь, вертолетным транспортом.

По материалам многолетних наблюдений пространственная изменчивость уровней загрязнения растительного покрова и почв соединениями группы ПАУ, характеризуется снижением уровня содержания Σ ПАУ по мере удаления от основных локальных источников загрязнения, расположенных в пределах поселка. Характер и тенденции пространственного изменения среднесезонных концентраций ПАУ в растительном покрове и почвах на сети мониторинга представлены на рис. 5. Зависимости уровней загрязнения от расстояния до ТЭЦ могут быть аппроксимированы степенными функциями, при этом для почв показатель степени равен приблизительно $-0,79$ с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,58$. Для содержания Σ ПАУ во мхах и в сосудистых растениях степенной показатель близок к -1 , что указывает на преимущественно аэрозольный характер загрязнения. Из графиков видно, что на расстоянии 5–6 км от ТЭЦ концентрации ПАУ и во мхах, и в сосудистых растениях приближаются к фоновым значениям. Рассчитанные на основании опубликованных данных российских и зарубежных исследований в арктических и субарктических районах фоновые концентрации Σ ПАУ составляют во мхах 180 нг/г, в сосудистых растениях – 88,0 нг/г [7, 9, 10].

Характер изменчивости уровней загрязнения мха, сосудистых растений и почвенного покрова соединениями группы ПАУ, осредненных по выбранным районам, представлен на рис. 6. По вертикальной оси здесь отложена степень загрязненности в долях от максималь-

ной концентрации Σ ПАУ, по горизонтальной оси — удаление от поселка. Как видно из рисунка, линия тренда для мха, основного индикатора атмосферного загрязнения, характеризуется степенным законом с показателем -1.26 с $R^2=0.89$. Загрязненность мха соединениями ПАУ резко снижается в окрестностях поселка до 50% от наибольшей концентрации ПАУ, зафиксированной в поселке, а затем на расстоянии 2.5 км от ТЭЦ составляет всего 15% от этого значения, и далее уменьшается до фоновых значений на расстоянии 6 км.

В то же время линии тренда сосудистых растений и почвы, выраженные степенными уравнениями регрессии, имеют более пологий наклон, с высокой достоверностью аппроксимации R^2 , который составляет 0.75 для почвы и 0.94 для сосудистых растений. Загрязненность почвенного покрова и сосудистых растений изменяется синхронно по мере удаленности от поселка, составляя около 30% от максимума на расстоянии 2.5 км от ТЭЦ и 10% — на удаленности 5 и более км. Это указывает на аккумуляцию ПАУ в почве и последующее поступление из нее значительной части ПАУ в сосудистые растения через корневую систему, помимо общего для всего видов растительности аэрозольного загрязнения.

Согласно зарубежным нормативам содержания ЗВ в почве [8, 11], установлены допустимые концентрации (ДК) и концентрации уровней вмешательства (УВ) для суммы ПАУ. Согласно этим нормативам допустимая концентрация ПАУ составляет 1000 нг/г, а уровень вмешательства достигает 4000 нг/г.

За весь период наблюдений, с 2002 по 2010 годы, выявлено 36 случаев превышения ДК, из которых в 4 случаях отмечено превышение УВ более, чем в 2 раза (до 8140 нг/г). Все зафиксированные случаи превышения ДК и УВ приурочены к почвам, отобраным в районе поселка (площадка 2) и в ближайших окрестностях (площадка 3), расположенных на расстоянии 0.5–0.9 км от ТЭЦ в направлении господствующих ветров.

Из определяемых 16 соединений ПАУ в растительном и почвенном покрове фиксировались все соединения, отличающиеся своим вкладом в зависимости от видовой принадлежности и места расположения площадок отбора (локальный или фоновый полигон) (табл. 3). Как видно из таблицы 3, в растениях и почвах преобладают ПАУ самого разного генезиса, включая нафталин, фенантрен, пирен, флуорантен, хризен.

Антропогенные источники бенз(а)пирена могут быть стационарными (промышленные предприятия, ТЭЦ, крупные и мелкие отопительные

системы), загрязняющими атмосферу в относительно ограниченных районах, и передвижными (транспорт), выбросы которых распространяются на значительно большие территории. Одним из широко распространенных источников бенз(а)пирена является процесс горения практически всех видов горючих материалов. Бенз(а)пирен присутствует в дымовых газах, копоти и саже, оседающих в дымоходах и на поверхностях, имевших контакт со смолистыми веществами, содержащихся в продуктах сгорания. Природными источниками бенз(а)пирена могут считаться стихийно возникающие лесные пожары, он появляется в атмосфере также в результате извержения вулканов.

Уровень загрязненности почв бенз(а)пиреном оценивается по шкале, в соответствии с приложением Ж Рекомендаций Р 52.23.581–97 [6]. Степень загрязненности почв бенз(а)пиреном считается умеренной при его содержании от 20 до 30 мкг/кг, значительной при содержании от 31 до 100 мкг/кг и высокой при содержании более 100 мкг/кг. За период наблюдений был установлен 31 случай превышения ПДК для бенз(а)пирена, из которых в 2 случаях зафиксировано высокое загрязнение почв до 159 нг/г (8.0 ПДК) и в 15 случаях — значительное загрязнение почв бенз(а)пиреном. Следует отметить, что все указанные случаи также приурочены к почвам, отобраным из районов локального мониторинга (в первую очередь, с территории поселка Баренцбург и его ближайших окрестностей).

В молекулярно-дисперсном состоянии бенз(а)пирен может находиться лишь в ничтожно малых количествах. В воздухе он преимущественно связан с твердыми частицами атмосферной пыли. Твердые частицы, содержащие бенз(а)пирен, довольно быстро выпадают из воздуха вследствие седиментации (разрушение коллоида и выпадение осадка), а также с атмосферными осадками и переходят в почву, растения, почвенные воды и водоемы. Это обуславливает довольно большую изменчивость концентрации бенз(а)пирена в атмосферном воздухе, которая зависит не только от интенсивности выброса его из источника загрязнения, но и от метеорологических условий. Будучи химически относительно устойчивым, бенз(а)пирен может долгое время мигрировать из одних объектов в другие. В результате этой миграции объекты окружающей среды, не подвергавшиеся прямому воздействию источников ПАУ, становятся вторичными источниками его эмиссии [3].

Тренд изменчивости концентрации бенз(а)пирена в растительном покрове и почвах по мере удаления от ТЭЦ представлен на рис. 7.

Табл. 3

Процентное содержание приоритетных соединений ПАУ в растительном покрове и почвах локального и фонового полигонов

Соединения ПАУ	% от суммы ПАУ							
	сосудистые		мхи		почва			
	Локальный полигон	Фоновый полигон	Локальный полигон	Фоновый полигон	Локальный полигон	Фоновый полигон		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нафталин	58.6	43.0	39.2	36.4	37.4	36.0		
Аценафтилен	0.7	0.7	0.6	0.9	1.2	0.5		
Флуорен	3.5	4.2	2.8	3.8	2.2	2.7		
Аценафтен	0.7	0.1	0.6	1.0	0.1	0.1		
Фенантрен	22.2	29.1	30.2	25.3	28.2	28.9		
Антрацен	1.1	1.7	1.7	2.3	1.9	1.6		
Флуорантен	3.5	7.3	7.1	8.0	7.3	5.6		
Пирен	4.5	3.4	6.1	5.9	4.3	3.7		
Бенз/а/антрацен	0.3	0.8	0.8	1.1	1.5	2.2		
Хризен	1.6	3.3	3.2	3.9	3.1	2.1		
Бенз/б/флуорантен	1.2	2.9	3.0	5.4	4.5	5.6		
Бенз/к/флуорантен	0.7	1.0	1.1	1.8	1.8	2.5		
Бенз/а/пирен	0.4	0.7	0.9	1.3	1.8	2.5		
Дибенз/аh/антрацен	0.1	0.1	0.5	0.5	0.8	0.9		
Индено/123cd/пирен	0.4	0.3	0.7	0.7	1.4	1.8		
Бенз/ghi/перилен	0.4	1.1	1.6	1.8	2.5	3.4		
Сумма ПАУ, нг/г	403	117	1146	330	950	267		

По мере удаления от ТЭЦ запасы бенз(а)пирена в почвенно-растительном покрове сокращаются. Обращает внимание характер изменения концентрации бенз(а)пирена в почвенном покрове по мере удаления от поселка, параметры линии тренда которого аппроксимируются кривой степенного уравнения с величиной достоверности аппроксимации 0.60. На графике отчетливо прослеживается максимум концентрации бенз(а)пирена в почвах в районе окрестностей поселка (2) — до 40.0 нг/г (2.0 ДК), и переходном районе (3) — до 37.2 нг/г (1.9 ДК), в то время как в поселке вблизи от ТЭЦ (точка 1) уровень его содержания составил 16.0 нг/г (0.8 ДК).

Особенностью переходного района (3) является то, что он находится на небольшом удалении от поселка, но при этом значительно выше над уровнем моря

(перепад высот составляет примерно 100 м) и расположен по направлению господствующих ветров, обуславливающих осадение выходящих из ТЭЦ газов, копоти и сажи на подветренном склоне горы.

Параметры линии тренда изменения концентрации бенз(а)пирена во мхах по мере удаления от поселка аппроксимируются кривой степенного уравнения с величиной достоверности аппроксимации 0.58, что свидетельствует об уменьшении запасов бенз(а)пирена во мхах по мере удаления от центра загрязнения, причем на расстоянии 6 км от ТЭЦ они уменьшаются в 3 и более раза.

Характер загрязненности бенз(а)пиреном сосудистых растений по мере удаления от основного источника выражается линией тренда, аппроксимированной линейным уравнением с $R^2 = 0.52$. Уровень содержания бенз(а)пирена в сосудистых растениях примерно в 3 раза ниже, чем во мхах, и в 7–8 раз ниже, чем в почвенном покрове. На расстоянии 6 км от ТЭЦ запасы бенз(а)пирена в сосудистых растениях уменьшаются примерно в 5 раз.

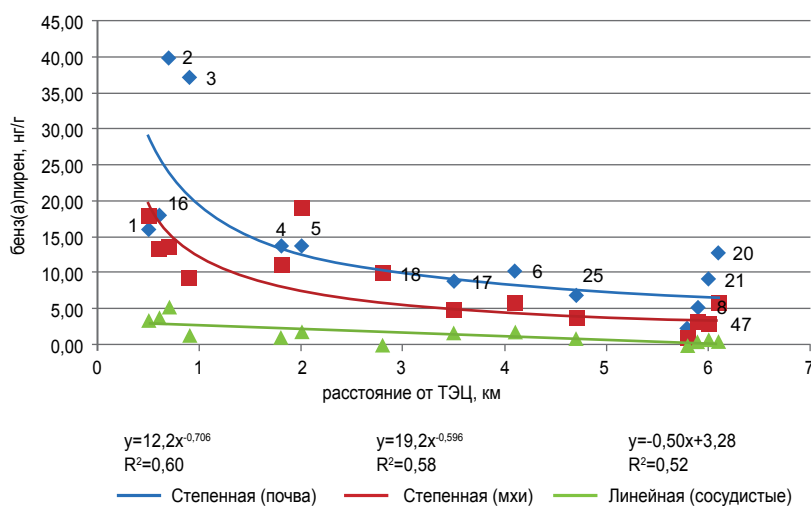


Рис. 7
Изменчивость содержания бенз(а)пирена в растительном покрове и почвах по мере удаления от ТЭЦ

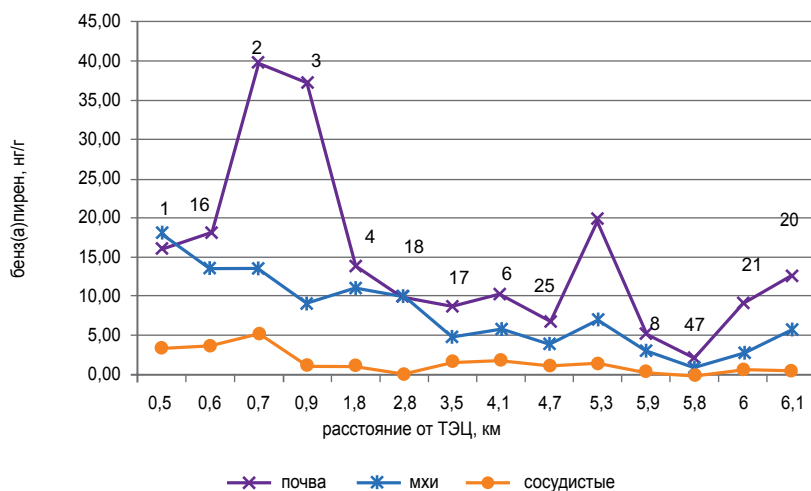


Рис. 8
Изменчивость среднееголетнего содержания бенз(а)пирена в растительности и почвах в районе пос. Баренцбург

Как видно из таблицы 3, не наблюдается существенного сокращения относительной доли этого углеводорода в ассоциациях ПАУ в районах фонового полигона, расположенного на удалении от основных источников загрязнения, что указывает на общий генезис и источник основной части бенз(а)пирена в районе исследований.

Характер изменчивости содержания бенз(а)пирена в растительном покрове и почвах на площадках отбора образцов наглядно представлен на рис. 8.

На графике виден значительный рост концентрации бенз(а)пирена в радиусе 0.5–1 км от ТЭЦ, в районе площадок 2 и 3, характеризующихся хроническим значительным загрязнением почвенного покрова (до 2.0 ПДК) и максимальными уровнями концентрации бенз(а)пирена в сосудистых растениях и мхах. Далее по мере удаления от ТЭЦ запасы бенз(а)пирена, аккумулярованные в почвенном и растительном покрове, снижаются, за

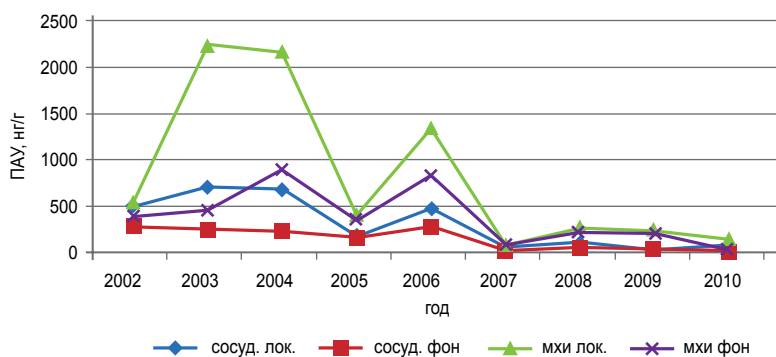
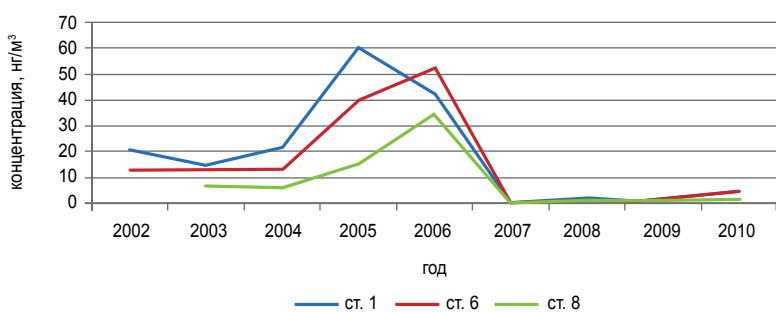


Рис. 9
Межгодовая изменчивость суммарного содержания ПАУ
в сосудистых растениях и мхах в районе
локального и фонового полигонов



Межгодовая изменчивость суммарного содержания ПАУ
в атмосферном аэрозоле в летне-осенний период
в районе поселка у ЗГМО (станция 1),
р. Грендалсэльва (станция 6) и оз. Биенда-Стемме (станция 8)

исключением площадки 7 (вертолетная площадка), являющейся точечным источником поступления ПАУ в окружающую среду из-за активной эксплуатации вертолетного и автомобильного транспорта, локально загрязняющего приземную атмосферу на ограниченной территории.

Согласно Приложению Ж нормативного документа Р 52.24.581–97 [6], при содержании бенз(а)пирена в растительном покрове менее 10 нг/г степень загрязнения растительного покрова считается «умеренной», при его концентрациях от 11 до 20 нг/г – «значительной», при содержания более 20 нг/г – «высокой». На рисунке 8 видно, что на расстоянии до 2.8 км от ТЭЦ отмечается «значительная» загрязненность мхов бенз(а)пиреном, дальше от ТЭЦ загрязненность мха «умеренная». Загрязненность сосудистых растений ниже, чем у мхов, и на всей территории загрязненность фиксируется, как «умеренная».

Таким образом, по результатам выполненного исследования установлено, что в пределах поселка в радиусе 1 км от ТЭЦ (площадки отбора 1, 2, 16) и в районе вертолетной площадки почвенный покров характеризуется хроническим загрязнением бенз(а)пиреном и другими ПАУ. В этих же районах наблюдаются значительные уровни концентрации ПАУ в растительном покрове, особенно во мхах.

Характер межгодовой изменчивости загрязненности растительного покрова на территории локального и фонового полигонов за период 2002–2010 годов представлен на рис. 9, иллюстрирующем, что несмотря на количественную разницу в уровнях содержания ПАУ, характер их поступления в сосудистые растения и мхи на протяжении всего периода наблюдений был практически одинаковым.

При сравнении данных локального и фонового мониторинга, можно заметить совпадение пиков, соответствующих годам с наиболее загрязненными образцами растительности (2004 и 2006 гг.). Выполненные в этот период наблюдения за содержанием ПАУ в атмосферном аэрозоле на станциях, расположенных в районе поселка (ст. 1) и станциях фонового полигона – р. Грендалсэльва (ст. 6)

и оз. Биенда-Стемме (ст. 8), зафиксировали резкий рост концентрации ПАУ в 2005 и 2006 годах. Максимальное содержание ПАУ в 2006 году было отмечено в аэрозолях на фоновом полигоне (рис. 10).

Сильное аэрозольное загрязнение, зафиксированное в 2004–2006 г., было обусловлено частыми случаями возгорания отвалов горных пород в окрестностях поселка. Последствия возгорания ощущались на значительном расстоянии от Баренцбурга и спровоцировали синхронное увеличение загрязнения ПАУ во мхах и сосудистых растениях, как в пределах локального, так и фонового полигонов (рис. 9).

Начиная с 2007 года в целом можно отметить тенденцию к снижению средних суммарных концентраций ПАУ в растительном покрове исследуемого района, протекающего синхронно со снижением аэрозольного загрязнения. Эта тенденция

является прямым следствием проведения трестом «Арктикуголь» ряда природоохранных и рекреационных мероприятий: реконструкция ТЭЦ, рекультивация отвалов, а также снижением объемов добычи угля с соответствующим уменьшением активности грузоперевозок.

Заключение

Выполненные в период с 2002 по 2010 годы исследования загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами растительного покрова архипелага Шпицберген в районе пос. Баренцбург показали, что основным источником загрязнения растительного покрова соединениями ПАУ являются аэрозоли, поступающие в окружающую среду с выбросами промышленных объектов, расположенных в пределах рудника и его окрестностей, прежде всего угольной ТЭЦ.

Подтверждено, что наиболее показательным индикатором аэрозольного загрязнения воздуха соединениями ПАУ является сообщество мхов с развитой поверхностью листьев и круглогодичным вегетационным периодом. Что касается сообщества сосудистых растений, то их вегетационный период в арктической зоне, когда надземная часть контактирует с атмосферным воздухом, весьма короток. Поэтому поступление ПАУ из атмосферного воздуха в сосудистые растения и накопление в них концентраций ПАУ в разы ниже, чем у мхов. Хотя сосудистые растения обладают развитой корневой системой, получающей дополнительные количества ПАУ из загрязненных почв, этот вклад незначителен и реально прослеживается только в фоновых районах при низких уровнях содержания ПАУ.

В результате исследования также установлено, что на расстоянии 6 км от пос. Баренцбург в растительности значительную долю общего содержания токсичных соединений ПАУ составляет бенз(а)пирен, источником которого являются объекты инфраструктуры рудника, особенно угольная ТЭЦ. Наличие техногенной составляющей в загрязнении растительности ПАУ на таких расстояниях свидетельствует, что выбранная сетка расположения пробоотборных площадок фонового полигона не обеспечивает в полной мере контроль за дальностью распространения аэрозольного загрязнения ПАУ подстилающей поверхности в районе пос. Баренцбург. При проведении дальнейших исследований границы фонового полигона следует перенести на расстояние как минимум 12–15 км от рудника и ТЭЦ.

Литература:

1. *Горная энциклопедия*. Том 1.—М.: Советская энциклопедия, 1984. 560 с.
2. *Кашулина Г.М., Баскова Л.А., Лихачев А.Ю.* Химический состав растений окрестностей Баренцбурга. Ежегодник Кольской ГМК. №5, часть.2.— Мурманск, 2007. 234 с.
3. *Распределение полициклических углеводородов в различных средах*. Гаджиева С. Р. Аминбеков А. Ф., Алиева Т. И., Гурбанпур Ш. Б. Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. N 4. 2009 г.
4. *Ровинский Ф.Я., Воронова Л.Д., Афанасьев М. И., Денисова А. В., Пушкарь И.Г.* Фоновый мониторинг загрязнения экосистем суши хлороорганическими соединениями. Л., Гидрометеиздат, 1990, 272 с.
5. *Шевченко В.В., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Куценогий К.П., Смирнов В.В., Штайн Р.* Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду// Аэрозоли Сибири. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2006, 548 с. (С. 148–184)
6. *P 52.23.581–97* Организация и функционирование системы специальных наблюдений за состоянием природной среды в районах развития угледобывающей промышленности и сопутствующих производств.
7. *«Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген (пос. Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 годов»* Б.Н. Демин, А.П. Граевский, А.С. Демешкин, С.В. Власов, С.С. Крылов, Н.А. Лалетин, С-Пб, Изд. ААНИИ, 2011, 316 с.
8. *СП 11-102-97*. Свод правил «Инженерно-экологические изыскания для строительства» Критерии экологической оценки загрязнения почв в соответствии с «Neue Niederlandische Liste». Altlasten Spektrum 3/95. М., 1997.
9. *AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues*. 1998. Oslo, Norway, 859 pp.
10. *AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic*. ©Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2004. Published by Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.
11. *Neue Niederlandische Liste*. Altlasten Spektrum 3/95
12. *Савченко Т.И., Чанкина О.В., Попова С.А., Куценогий К.П.* Связь элементного состава атмосферных аэрозолей и компонентов биогеоценоза// Оптика атмосферы и океана, 2010. Том 23. С. 620–625.