

следствиях // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3 (60). С. 5–13.

8. Данилов В.И. О некоторых вопросах погодичной динамики степных фитоценозов // Бюл. Моск. общества испытателей природы. Отд. биол. 1981. Т. 86. Вып. 5. С. 106–120.

9. Braun-Blanquet J. Planzensociologie. 3 Aufl. Wien., N.-Y.: 1964. 865 p.

10. Лавренко Е.М. Европейские луговые степи и остепнённые дуга // Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. С. 220–231.

References

1. Kerzhentsev A.S. The Functional Ecology. M.: Nauka. 259 p. (in Russian).

2. Vernadsky V.I. The Biosphere and Noosphere. M., Nauka, 1989. 260 p. (in Russian).

3. Ramenskiy L.G. Select of work (The Problem and methods of studying of a vegetative cover). L.: Nauka, 1971. 334 p. (in Russian).

4. Zelenska N.N. Kerzhentsev A.S. Structural and functional unity of vegetation and soil is a mechanism

of monitoring anthropogenically disturbed territories ecosystems functioning (in connection with the planting of Kyoto forests in the steppe zone // Nauchniye vedomosti BelGU. Ser. Estestv. nauki. 2013. № 3 (146). V. 22. P. 121–126 (in Russian).

5. The Second Assessment Report on climate change and their impact on the territory of the Russian Federation. In: Climate Change. T. 1. M.: Roshydromet, 2014. 61p. (in Russian).

6. Mori A.S., Furukawa T., Sasaki T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change // Biological Reviews. 2013. T. 88. № 2. P. 349–364.

7. Kulikov A.I., Ubugunov L.L., Mangataev A.Ts. Global climate change and its impact on ecosystems // Aridnye Ecosistemy. 2014. Т. 20. № 3 (60). P. 5–13 (in Russian).

8. Danilov V.I. On some issues year-dynamics of steppe phytocenoses // Bul. Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel. Biologii. 1981. V. 86 (5). P. 106–120 (in Russian).

9. Braun-Blanquet J. Planzensociologie. 3 Aufl. Wien., N.-Y.: 1964. 865 p.

10. Lavrenko E.M. European meadow steppes and steppe meadows // Vegetation of the European part of the USSR. L.: Nauka. 1980. P. 220–231 (in Russian).

УДК 631.4:577.4

Анализ загрязнения нефтепродуктами и хлорорганическими соединениями почв и грунтов в окрестностях российских антарктических станций

© 2017. А. В. Лупачёв¹, к. б. н., с. н. с., Н. Ф. Деева², с. н. с.,
Д. Ю. Аладин², н. с., С. М. Севостьянов², к. б. н., зав. лабораторией,
Д. В. Дёмин², к. б. н., с. н. с.,

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2,

² Институт фундаментальных проблем биологии РАН,
142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2,
e-mail: a.lupachev@gmail.com

Проведены исследования содержания углеводородов нефти и её производных антропогенного происхождения (УВН) совместно с природными органическими углеводородами (ОУВ) в почвах и грунтах; хлорорганических соединений в орнитогенных отложениях, животных тканях и органогенных горизонтах почв в окрестностях российских полярных исследовательских станций в Антарктике. Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз накапливают углеводороды нефти и её производные – в среднем от 150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более. В представленных образцах обнаружен ряд стойких органических загрязнителей (СОЗ) – пестицидов и их метаболитов. Во всех пробах присутствует гексахлорбензол (ГХБ). Присутствие повышенных доз дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) и чрезвычайно высокое содержание его метаболитов в животных тканях свидетельствует о том, что не происходит снижения содержания этого химиката в экосистемах Антарктики. Накопление СОЗ связано как с трансграничной передачей в виде аэрозолей, так и с поступлением с океаническими водами.

Ключевые слова: Антарктика, антропогенное загрязнение, нефтепродукты, дизельное топливо, стойкие органические загрязнители, ДДТ.

Analysis of pollution with oil products and organochlorines of soils in the vicinity of Russian Antarctic stations

A. V. Lupachev¹, N. Ph. Deeva², D. Y. Aladin², S. M. Sevostyanov², D. V. Demin²,

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, Russia, 142290,

² Institute of Basic Biological Problems RAS, 1,
2 Institutskaya St., Pushchino, Moscow Region, Russia, 142290,
e-mail: a.lupachev@gmail.com

The investigations were conducted on the content of petroleum hydrocarbons and its derivatives of anthropogenic origin together with natural organic hydrocarbons in soils; organochlorine compounds in ornithogenic sediments, in animal tissues and in organogenic horizons of soils in the vicinity of Russian polar research stations in the Antarctic. Soils and grounds under the linear facilities and near oil depots accumulate petroleum hydrocarbons and its derivatives, their amount is from 150 to 600 mg/kg on the average, in local cases up to 2200 mg/kg or more. It was re-established that the major share in the composition of petroleum hydrocarbons in anthropogenically contaminated soils and grounds comprises heavy and slightly toxic fractions; the most toxic volatile fractions are not accumulated as a result of harsh weather conditions (primarily, wind and insolation regimes), as well as of a high degree of skeletal fraction of substrates. A number of persistent organic pollutants (POPs), such as pesticides, herbicides, and their metabolites are found in the submitted sample. All samples contain hexachlorobenzene (HCB). The presence of high doses of dichlor-diphenyltrichlor-ethane (DDT) and its extremely high content of metabolites in animal tissues indicates that there is no decrease in the level of this chemical in Antarctic ecosystems. The accumulation of POPs is due to both cross-border transfer in the form of aerosols (detected by moss-lichen associations), and to the influx of ocean water, to further movement through food chains in the ecosystem and access with waste products (guano and birds and animal tissues).

Keywords: Antarctica, anthropogenic pollution, petroleum, diesel fuel, persistent organic pollutants (POPs), DDT.

Антропогенные объекты и сооружения в Антарктике занимают от 10–15% (станции Прогресс-2, Новолазаревская) до 80% (Мирный) свободной ото льда территории оазисов, а зона активного влияния человека часто перекрывает всю их площадь. На территории одного оазиса могут одновременно базироваться от 2–4 до 7 научных станций различных государств. Практически во всех освоенных оазисах выявлено загрязнение компонентов экосистем нефтепродуктами, стойкими органическими соединениями [1–3].

Исследование в почвах и грунтах содержания персистентных органических веществ (ПОВ), стойких органических токсичных загрязняющих веществ и смесей, существующих длительное время в биосфере и оказывающих сильное негативное воздействие на живые организмы, стало одним из первых в российской практике.

Объекты и методы исследования

Почвы антарктических оазисов изучались на ключевых участках в ходе 55–57 Российских антарктических экспедиций (2009–2012 гг.) – станции Новолазаревская, Молодёжная, Союз, Дружная-4, Прогресс,

Мирный, Оазис (Бангера), Ленинградская, Русская и Беллинсгаузен (рис.). За указанный период сделано 66 почвенно-геоботанических и ландшафтных описаний, отобрано около 140 образцов фоновых и антропогенно нарушенных почв и грунтов, различными методами проанализировано более 120 образцов.

Для характеристики физико-химических свойств почв и грунтов применялись общепринятые методы [4].

Образцы для определения содержания углеводов нефти отбирались двумя способами: воздушно-сухая масса – в хлопчатобумажные воздухопроницаемые мешки для почвенных проб, замороженная масса – в воздушнонепроницаемые стерильные пакеты. Таким образом удалось определить долю летучих соединений, теряющихся при транспортировании образцов в воздушно-сухом состоянии. Валовое содержание нефтяных углеводов в фоновых и антропогенно нарушенных почвах определялось при помощи инфракрасного спектрометра АН-2 [5].

Образцы почв, растительных и животных остатков были проанализированы на содержание стойких органических загрязнителей в химико-аналитическом центре НПО «Тайфун».

Результаты и их обсуждение

Для всего ряда почв характерна малая мощность почвенного профиля (от 5 до 25 см). Сухие почвы каменных мостовых, лишённых растительности, преимущественно слабощелочные, содержание органического углерода ($C_{орг.}$) составило 0,2–1% (табл. 1). Почвы под лишайниками слабокислые и кислые, $C_{орг.}$ достигает 8–10% в верхних горизонтах и около 1–5% в средних частях профилей. Почвы влажных местообитаний под водорослево-бактериальными матами находятся в диапазоне от нейтральных до кислых, $C_{орг.}$ – 0,5–2%. Почвы под мхами слабокислые, $C_{орг.}$ – 1–3% (максимум 8–10% в верхних горизонтах). Почвы под линьками пингвинов как современными, так и брошенными, сильнокислые, $C_{орг.}$ равно 4–6% (максимум около 20% в верхних горизонтах). Доля мелкозёма (< 1 мм) в этом ряду почв колеблется от 10–15% до 30–40% (табл. 1). Отношение физического песка к физической глине (ФП/ФГ) преимущественно варьирует в пределах от 88–95% до 5–12%.

Почвы, подверженные антропогенному воздействию, содержат 40–50, а порой и до 70% мелкозёма. Несмотря на слабое оструктурирование и агрегирование материала, загрязняющие вещества способны аккумулироваться на поверхностях отдельных частиц и зёрен, где широко распространены плёнки вторичных минералов (показатель гигроскопической влажности достигает 3–7%, в отличие от 0,5–1% в ненарушенных почвах). Нарушенные почвы имеют более низкие значения pH по сравнению с фоновыми (табл. 1).

Анализ содержания углеводородных групп. Проведены исследования содержания



Рис. Карта-схема расположения ключевых участков исследований в Антарктиде

углеводородов нефти и её производных антропогенного происхождения (УВН) совместно с природными органическими углеводородами (ОУВ) в почвах и грунтах оазисов Антарктиды (УВН+ОУВ). Выявлено, что местообитания, не затронутые антропогенной деятельностью, могут содержать от 40–60 до 120–140 (в реголитах – продукт выветривания массивных горных пород без растительного покрова), до 250–300 мг/кг (в почвах с развитым органо-генным профилем) [3]. На данном этапе исследований трудно определить абсолютную долю УВН в суммарном показателе. Но по косвенным признакам (отношению содержания $C_{орг.}$ к валовому содержанию УВН+ОУВ) можно предположить, что значимым показателем загрязнения для антарктических почв является валовое содержание УВН+ОУВ более 100–150 мг/кг для реголитов, и более 250–

Таблица 1
Содержание органического углерода, углеводородов нефти антропогенного происхождения и природных органических углеводородов

Образец	Станция	Индекс образца	УВН+ОУВ мг/кг	$C_{орг.}$	pH водн.
Фоновые почвы	Новолазаревская	N1-01	192,4	0,41	6,86
		N1-03	120,2	2,75	6,74
		N1-04	356,7	1,13	6,62
		N1-06	227,7	0,98	7,09
	Беллинсгаузен	В1-03	333,3	4,10	5,76
Антропогенно нарушенные почвы	Новолазаревская	N1-09 1	415,8	0,24	7,17
		N1-09 2	573,7	0,24	6,88
		N1-09 3	1402,4	2,04	6,49
	Беллинсгаузен	В1-04 1	678,5	0,56	7,58
		В1-04 2	1834,8	0,72	6,97
Русская	Rs-04	2205,9	1,77	4,98	

Таблица 2

Содержание стойких органических загрязнителей в почвах, орнитогенных отложениях и животных тканях

Определяемое соединение, мкг/кг сухого веса	Материал образца				
	животные ткани	орнитогенные отложения			органогенный горизонт
	№ 1, ст. Новолазаревская	№ 2, ст. Дружная-4	№ 3, ст. Прогресс-2	№ 4, ст. Мирный	№ 6, ст. Русская
Гексахлорбензол	166,42	1,25	1,07	0,30	1,54
Гексахлоран	6,62	<0,05*	<0,05	<0,05	<0,05
Гептахлор эпоксид	0,919	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Оксихлордан	30,87	<0,08	0,73	<0,08	<0,08
Транс-хлордан	2,66	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Транс-нонахлор	12,87	<0,01	0,14	<0,01	<0,01
2,4'-ДДЕ	1,64	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
4,4'-ДДЕ	265,60	<0,03	2,16	<0,03	0,13
4,4'-ДДД	5,66	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
2,4'-ДДТ	1,16	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
4,4'-ДДТ	13,40	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
Дильдрин	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,87
Мирекс	33,48	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03

Примечание: * – ниже уровня определения.

300 мг/кг – для почв с развитым наземным растительным покровом или поверхностными орнитогенными отложениями (табл. 1).

Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз накапливают также нефтепродукты – от 150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения.

Для определения доли летучих соединений в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах проведено сравнение содержания УВН+ОУВ в образцах, отличающихся по характеру пробоподготовки. Данные по валовому содержанию УВН+ОУВ показывают, что различие между двумя данными группами образцов составляет порядка 10%, причём воздушно-сухие образцы иногда содержали больше УВН+ОУВ, чем их мёрзлые, изолированные от окружающей среды аналоги. Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что основную долю в составе УВН в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах антарктических оазисов составляют тяжёлые и слаботоксичные фракции, а наиболее токсичные высоколетучие фракции УВН не накапливаются вследствие жёстких климатических условий, а также высокой степени скелетности данных субстратов.

Анализ содержания хлорорганических соединений. В представленных образцах обнаружен ряд СОЗ – пестицидов и их метаболитов

(табл. 2). Во всех пробах присутствует гексахлорбензол (ГХБ). Присутствие повышенных доз ДДТ и чрезвычайно высокое содержание его метаболитов, в частности 4,4'-ДДЕ (дихлородифенилдихлороэтилен) в животных тканях, обнаруженных на поверхности органогенных горизонтов почв, свидетельствует о том, что не происходит снижения уровня этого химиката в экосистемах Антарктики [6]. Присутствие инсектицида «Мирекс» в тканях животных и отсутствие его в других образцах может быть связано с поступлением его в организм птиц по трофическим цепям.

Мхи и лишайники, имеющие развитую поверхность, обычно относят к индикаторам атмосферного загрязнения [7]. Отсутствие у этих растений корневой системы и преобладание аэриального поступления вещества позволяет считать их аккумуляторами атмосферных аэрозолей, содержащих загрязняющие вещества.

Выводы

1. Определено фоновое содержание природных органических углеводов в ненарушенных почвах оазисов Антарктиды. Почвы и грунты под линейными объектами и вблизи нефтебаз, наравне с природными органическими углеводородами, накапливают углеводороды нефти и её производные – в среднем от

150 до 600, а в локальных случаях 2200 мг/кг и более, что соответствует среднему и высокому уровням загрязнения.

2. С учётом этих показателей определено, что значимыми для антарктических почв показателями загрязнения является валовое содержание углеводов нефти и органических углеводов: более 100–150 мг/кг для реголитов, лишённых растительного покрова, и более 250–300 мг/кг – для почв с развитым наземным растительным покровом или поверхностными орнитогенными отложениями.

3. Предварительно установлено, что основную долю в составе углеводов нефти в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах составляют тяжёлые и слаботорксичные фракции, а наиболее токсичные высоколетучие фракции не накапливаются вследствие жёстких климатических условий (ветровой режим и инсоляция), а также высокой степени скелетности данных субстратов.

4. Проведено определение стойких органических загрязнителей в образцах животных тканей, орнитогенных отложений и органо-генных горизонтов почв. Накопление поллютантов, выявленное в напочвенных покровах, связано как с трансграничным переносом этих веществ в виде аэрозолей (мохово-лишайниковые ассоциации), их дальнейшим растворением и переносом с поверхностными и грунтовыми водами (бактериально-водорослевые маты), так и с поступлением с океаническими водами, дальнейшим перемещением по пищевым цепям и выходом в экосистему с продуктами жизнедеятельности (гуано и животные ткани птиц).

Работы выполнены при частичной поддержке грантов РФФИ (15-29-02629офи-м; 16-04-01050а, 15-04-06118а).

Литература

1. Абакумов Е.В., Ладыгин Е.Д., Габов Д.А., Крыленков В.А. Содержание полициклических ароматических углеводов в почвах Антарктиды на примере Российских полярных станций // Гигиена и санитария. 2014. № 1. С. 31–35.

2. Какарека С.В., Кухарчик Т.И. Загрязнение природной среды в районах базирования антарктических научных станций // Природопользование. Сб. научных

трудов Института природопользования НАН Беларуси. 2015. Вып. 27. С. 222–229.

3. Aislabie J., Balks M., Astori N., Stevenson G., Symons R. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fuel-oil contaminated soils, Antarctica // Chemosphere. 1999. V. 39 (13). P. 2201–2207.

4. Фомин Г.С., Фомин А.Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. М.: Протектор, 2001. 300 с.

5. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение / Под ред. А.А. Мальцева. М.: Мир, 1982. 328 с.

6. Аладин Д.Ю., Дёмин Д.В., Деева Н.Ф., Лупачёв А.В., Ильина А.А., Севостьянов С.М. Анализ загрязнения хлорорганическими соединениями компонентов экосистемы Антарктиды // Известия Уфимского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 110–113.

7. Thomas W., Simon H., Ruhling A. Classification of plant species by their organic (PAH, PCB, HBC) and inorganic (heavy metals) trace pollutant concentrations // Science of the Total Environment. 1985. V. 46. P. 83–94.

References

1. Abakumov E.V., Lodygin E.D., Gabov D.A., Krylenkov V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in Antarctica soils as exemplified by the Russian polar stations // Gigena i Sanitariya. 2014. № 1. P. 31–35 (in Russian).

2. Kakareka S.V., Kukharchyk T.I. Environmental contamination of Antarctic scientific stations Location sites // Prirodopolzovanie. Sb. nauchnikh trudov Instituta Prirodopolzovaniya NAN Belarusi. 2015. V. 27. P. 222–229 (in Russian).

3. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fuel-oil contaminated soils, Antarctica // Chemosphere. 1999. V. 39 (13). P. 2201–2207.

4. Fomin G.S., Fomin A.G. The soil. Quality control and environmental safety by international standards. Manual. M.: Protector, 2001 300 p.

5. Smith A. Applied Infrared Spectroscopy: fundamentals, techniques, analytical application / Ed. A.A. Maltsev. M.: Mir, 1982. 328 p. (in Russian).

6. Aladin D.Yu., Demin D.V., Deeva N.F., Lupachov A.V., Ilina A.A., Sevostyanov S.M. Analysis of Organochlorine contamination in Antarctic ecosystem components // Izvestiya Ufinskogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. № 3. P. 110–113 (in Russian).

7. Thomas W., Simon H., Ruhling A. Classification of plant species by their organic (PAH, PCB, HBC) and inorganic (heavy metals) trace pollutant concentrations // Science of the Total Environment. 1985. V. 46. P. 83–94.