

УДК 504.054

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390

ХЛОРФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕРАХ СУБАРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

Е.С. КОЛПАКОВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, г. Архангельск, Россия

kolpelen@yandex.ru

CHLOROPHENOL COMPOUNDS IN FRESHWATER LAKES OF SUBARCTIC REGIONS

E.S. KOLPAKOVA

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Arkhangelsk, Russia

kolpelen@yandex.ru

Received July, 12, 2018

Accepted October, 12, 2018

Keyword: bottom sediments, chlorinated phenols, gas chromatography, pentachlorophenol, subarctic lake.

Summary

Chlorophenol compounds, representing a group of chlorinated phenols and their derivatives, are ionic compounds with different degree of hydrophobicity, lipophilicity and acidity. As potential anthropogenic sources of pollution of ecosystems by chlorophenol compounds is the regional atmospheric transport of these compounds from the territories of border regions. At the same time, the sources of the diversity of chlorophenol compounds are the natural processes of enzymatic biosynthesis in the components of the environment. These compounds are especially dangerous for the Arctic and subarctic ecosystems, since the conditions of the cold climate contribute to their long-term preservation, which increases their negative impact on living organisms.

The research area includes subarctic small thermokarst lakes located in the central part of Vaigach Island and in Bolshezemelskaya tundra.

The isolation of chlorophenol compounds from bottom sediment samples was carried out by accelerated liquid flow-through extraction with a hot mixture of organic solvents with extraction of easily and hardly extractable chlorophenol compounds and subsequent analysis on a gas chromatograph with an electron-capture detector. The total content of chlorophenol compounds was determined by summing their concentrations in the easily and hardly extractable fractions.

Citation: *Kolpakova E.S.* Chlorophenol compounds in freshwater lakes of subarctic regions. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 380–390. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390.

The bottom sediments of the investigated lakes were characterized by a relatively high content of chlorophenol compounds. Toxic pentachlorophenol was found only in the sediments of lake Tundra Bolshezemelskaya. The revealed presence of chlorophenol compounds in the bottom sediments of the investigated lakes suggests their spread in the environment by atmospheric transport from abiogenic sources, as well as natural enzymatic and biochemical processes in these Arctic waters.

Поступила 12 июля 2018 г.

Принята к печати 12 октября 2018 г.

Ключевые слова: газовая хроматография, донные осадки, пентахлорфенол, субарктические озера, хлорированные фенолы.

В работе представлены результаты исследования по изучению уровней содержания и компонентного состава хлорированных фенолов и их производных в донных осадках пресноводных озер на территории Большеземельской тундры и острова Вайгач. Приведены профили хлорфенольных соединений, а также предполагаемые источники и пути поступления этих соединений в тундровые озерные экосистемы субарктических территорий Европейского Севера России.

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, определяющим экологическое состояние природных экосистем, является присутствие токсичных хлорорганических соединений, склонных к накоплению и переносу на большие расстояния. Особую опасность эти соединения представляют для арктических и субарктических экосистем, поскольку условия холодного климата способствуют их длительному сохранению. Среди хлорорганических соединений можно выделить группу хлорфенольных соединений (ХФС), а именно высоко- и низкохлорированные фенолы и их производные (хлорированные метокси- и гидроксифенолы), отличающиеся по токсичности и липофильности. Эти ионогенные соединения в разной степени способны сорбироваться на твердых частицах органического вещества, что влияет на их биодоступность и подвижность в природных средах [1]. Способность к переносу и затрудненная деградация в условиях холодного климата способствуют накоплению этих соединений в компонентах экосистем, что усиливает негативное влияние токсичных хлорфенольных соединений на живые организмы.

К наиболее значимым с точки зрения экологической опасности для окружающей среды отнесены высокозамещенные хлорированные фенолы, гваяколы (метоксихлорфенолы) и катехолы (гидроксихлорфенолы) с высокой липофильностью ($\lg K_{ow} = 3,7-5,1$), острой и подострой токсичностью [1, 2]. Самым токсичным среди них является пентахлорфенол.

Ранее в осадках малых озер, находящихся на юго-западе Архангельской области в условиях отсутствия прямой антропогенной и техногенной нагрузки, нами был выявлен широкий спектр хлорфенольных соединений [3, 4]. Уровни содержания и пространственное распределение этих соединений в осадках формировались под влиянием атмосферного переноса путем сухих высадений и влажных выпадений на почву и в водную среду в результате смыва с водосборных площадей, покрытых растительностью, и перемещения в адсорбированном виде с частицами пыли и почвы ветровыми потоками. Пентахлорфенол (ПХФ) был обнаружен в низких концентрациях в биодоступном состоянии. Состав хлорфенольных соединений, основная часть которых приходилась на долю низкохлорированных фенолов, представлен как природными метаболитами, так и конечными продуктами биodeградации ПХФ

в условиях, благоприятных для протекания этих процессов [5]. Таким образом, в продолжение проведенных исследований представляло несомненный интерес изучение процессов формирования в донных осадках субарктических озер концентрационных профилей хлорфенольных соединений, входящих в биогеохимический цикл хлора, а также выявление источников и путей их поступления в озерные экосистемы.

Целью настоящих исследований являлось изучение распространения на Европейском Севере России хлорфенольных соединений. Для достижения поставленной цели выполнены исследования донных осадков субарктических озер по получению данных об уровнях содержания и компонентном составе хлорфенольных соединений, включая токсичный ПХФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Областью исследования являются субарктические малые термокарстовые озера (рис. 1), расположенные в арктическом поясе России, в центральной части острова Вайгач (Тундровое-1 и Талатинское), и озеро, расположенное в Большеземельской тундре (Тундровое-2). В исследованных озерах в период летней экспедиции (август – сентябрь 2010 года) по изучению тундровых ландшафтов на Европейском Севере сотрудниками Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова были отобраны образцы донных осадков [6].

Пробы донных осадков (горизонт от 0 до 10 см) отбирали с помощью ударной прямоточной грунтовой трубки (Aquatic Research Instruments: <http://www.>



Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследований.

1 — остров Вайгач — озера Тундровое-1 и Талатинское; 2 — озеро Тундровое-2; 3 — Кенозерский национальный парк; 4 — Геобиосферный стационар

Fig. 1. Map-location of research objects.

1 — Vaygach Island — Tundrovoye-1 Lake and Talatinskoye Lake; 2 — Tundrovoye-2 Lake; 3 — Kenozersky National Park; 4 — Geobiospheric Hospital

aquaticresearch.com) с внутренним диаметром 110 мм и длиной 1 м. Отобранные пробы помещали в полиэтиленовые пакеты, из которых для предотвращения окисления проб максимально отжимался воздух. Географическое место отбора проб фиксировалось с помощью спутникового определителя координат GPS-навигатора [7].

Определение концентраций ХФС проводили в соответствии со стандартом ISO 14154:2005 [8]. Для получения полной информации о количестве и поведении (способности к перемещению и биодоступности в органической матрице) хлорфенольных соединений в окружающей среде необходимо проводить извлечение двух фракций — легко- и трудноэкстрагируемых соединений [1].

Пробоподготовку общего содержания хлорфенольных соединений проводили методом последовательного извлечения легко- и трудноэкстрагируемых соединений. Для извлечения фракции легкоэкстрагируемых хлорфенольных соединений использовали метод прямой экстракции смесью органических растворителей гексан-ацетон (3:1) с последующей обработкой 0,2 н раствором гидроксида натрия. Щелочной раствор подкисляли, обрабатывали гексаном и реэкстрагировали раствором карбоната калия.

Остаток анализируемой твердой матрицы после экстракции обрабатывали более концентрированным 10 М раствором NaOH и подкисляли, дополнительно извлекая фракцию трудноэкстрагируемых хлорфенольных соединений. Такая обработка способна разрушить сильные связи ассоциатов и окружающее органическое вещество, защищающее соединения [1].

Хлорфенольные соединения, выделенные из каждой фракции, дериватизировали уксусным ангидридом в слабощелочной среде для получения производных. Полученные ацетильные производные хлорфенольных соединений анализировали на газовом хроматографе «Цвет 800» (производитель ОАО «Цвет», г. Дзержинск) с детектором постоянной скорости рекомбинации и капиллярной колонкой с неполярной неподвижной фазой VS-1 (25 м × 0,25 мм). Для идентификации и количественного определения индивидуальных хлорированных фенолов, метоксифенолов (гваяколов) и гидроксифенолов (катехолов) использовали стандартные образцы двадцати трех соединений производства «Sigma Aldrich», «Supelco Analytical» и ЗАО «НПО Экрос». Условия хроматографирования: температура испарителя — 240 °С, температура детектора — 300 °С, газ-носитель — азот; температура термостата колонки увеличивалась от 100 °С до 230 °С со скоростью 5 °С/мин. Для обработки хроматографических данных применяли программный пакет «Цвет-Хром». Пределы обнаружения индивидуальных соединений — от 0,001 до 0,005 мкг/г воздушно-сухого образца.

Общее содержание хлорфенольных соединений определяли суммированием их концентраций в легко- и трудноэкстрагируемой фракциях.

Определение концентраций органического углерода выполняли на анализаторе общего органического углерода методом высокотемпературного (800 °С) каталитического сжигания в токе кислорода с последующим определением общего и неорганического углерода с использованием детектора инфракрасного излучения [9]. Диапазон измерений от 0,05 до 3000 мг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения физико-химических характеристик и хлорфенольных соединений, в том числе ПХФ, в донных отложениях исследуемых малых термокарстовых озер приведены в таблице 1.

Результаты определений физико-химических характеристик и хлорфенольных соединений в озерных осадках

Показатели	Тундровое-1	Талатинское	Тундровое-2
pH	7,25	7,47	5,79
C _{орг} , %	1,75	2,83	38,44
ХФС, мкг/г	0,015	0,001	0,185
ХФС/C _{орг} , мкг/гC _{орг}	0,86	0,04	0,48
ПХФ, мкг/г	Не обнаружено	Не обнаружено	0,008

Величина pH среды является одним из главных физико-химических факторов, влияющих на поведение хлорфенольных соединений, поскольку с повышением pH увеличивается степень ионизации хлорфенольных соединений, характеризующаяся величиной pKa.

Известно, что при естественных значениях pH хлорфенольные соединения могут быть полностью или частично ионизированными [10]. При этом в зависимости от формы хлорфенольные соединения имеют разные тенденции к сорбции в природной матрице: чем более неионизированной формы соединении, тем легче оно сорбируется.

В то же время степень сорбции хлорфенольных соединений сильно зависит от содержания органического углерода в осадках, возрастая с увеличением органического углерода (C_{орг}) [10]. Исходя из этого, по результатам определения физико-химических характеристик донных осадков исследуемых озер можно предположить, что торфянистые обогащенные органическим веществом осадки озера Тундровое-2, в отличие от глинистых отложений озер о. Вайгач, обладали лучшей сорбционной способностью в отношении ионогенных хлорфенольных соединений.

Донные осадки озера Тундровое-2 характеризовались сравнительно высоким содержанием хлорфенольных соединений (0,185 мкг/г), что на 1–2 порядка превышает концентрации хлорфенольных соединений, найденных в донных осадках озер о. Вайгач. Однако, после нормализации полученных данных на органическое вещество, результаты были не столь однозначны — как минимальные, так и максимальные значения отношения ХФС/C_{орг} отмечены в осадках озер о. Вайгач, хотя и для торфянистых отложений озера Тундровое-2 эта величина довольно значительна.

ПХФ в исследованных осадках был обнаружен лишь в осадках озера Тундровое-2, в количестве 0,008 мкг/г. Исследуемые районы отдалены от основных промышленных центров. Поскольку ПХФ и тетрахлорфенолы не образуются в природе, ввиду своей токсичности [11], присутствие в данных озерах антропогенных хлорфенольных загрязнителей обусловлено поступлением атмосферным переносом газовых выбросов предприятий Воркутинского района, где идет активная добыча каменного угля и его сжигание [6]. В то же время загрязнения в атмосферу могут вносить объекты нефтегазовой промышленности, в частности открытое сжигание нефтепродуктов в амбарах и котловинах Тимано-Печорской провинции [12]. ПХФ является основным соединением (наряду с 2,4,6-трихлорфенолом и 2,3,4,6-тетрахлорфенолом), образующимся при термических процессах (сжигание топлива органического происхождения, древесины) [13]. Накоплению ПХФ в озерных осадках способствовало высокое содержание C_{орг} (38,4 %), поскольку, обладая высоким ко-

**Содержание органического углерода и хлорфенольных соединений
в донных осадках малых озер на территории Архангельской области**

Показатели	Озера на юго-западе Архангельской области	
	Кенозерский национальный парк	Геобиосферный стационар
C _{орг.} , %	1,13–20,71	6,95–15,44
ПХФ, мкг/г	0,001–0,005	0,001–0,008
ХФС, мгк/г	0,004–0,129	0,003–0,089

эффицентом липофильности, это соединение активно сорбируется на органическом веществе [5]. В то же время сорбция ПХФ зависит и от pH осадков, снижаясь в нейтральных и увеличиваясь в кислых отложениях [11]. Возможно, слабокислая среда в осадках озера Тундровое-2 (pH 5,79) способствует большему удержанию ПХФ.

Как показано в таблице 2, найденные для исследованных тундровых озер концентрации пентахлорфенола сопоставимы с данными для донных осадков озер, не испытывающих антропогенного воздействия, расположенных на юго-западе Архангельской области [3], в Кенозерском национальном парке и Геобиосферном стационаре (рис. 1). Присутствие ПХФ в этих озерных осадках обусловлено влиянием атмосферного переноса от источников загрязнения, поскольку, являясь полуплетучим, это соединение способно к перемещению в окружающей среде на большие расстояния [11]. Следует отметить, что в осадках некоторых озер на юго-западе Архангельской области с таким же низким, как для осадков озер о. Вайгач, содержанием органического углерода ПХФ зафиксирован в количестве ниже аналитического предела определения [3, 4].

Характер распределения хлорфенольных соединений на хроматограммах исследованных субарктических озер был различен. Так, хроматограммы экстрактов донных осадков озера Тундровое-2, приведенные на рис. 2, характеризовались большим числом зарегистрированных пиков (22), особенно в легкоэкстрагируемой фракции. Более узкий спектр, состоящий преимущественно из высококипящих соединений, был зарегистрирован на хроматограммах экстрактов осадков, отобранных на о. Вайгач.

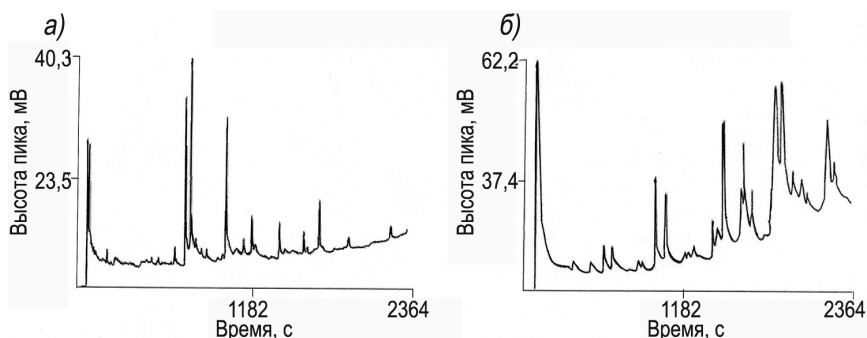


Рис. 2. Хроматограммы экстрактов ХФС донных осадков озера Тундровое-2 (а) и Саргозеро, Кенозерский национальный парк (б) в легкоэкстрагируемой фракции

Fig. 2. Chromatograms of CPC extracts of bottom sediments of Tundrovoye-2 Lake (a) and Sargozero Lake, Kenozersky National Park (b) in easily extractable fraction

При количественной интерпретации хроматограмм экстрактов донных осадков озер, расположенных на юго-западе Архангельской области, был выявлен более широкий спектр соединений, с наибольшим количеством пиков (44), зарегистрированных в легкоэкстрагируемой фракции. На хроматограммах трудноэкстрагируемой фракции экстрактов донных осадков хлорфенольные соединения также присутствовали, но в меньшем количестве (до 13 пиков).

По данным таблицы 3 по числу идентифицированных соединений исследованные осадки субарктических озер практически не отличались и характеризовались преимущественным присутствием трихлорфенолов (ТХФ) и тетрахлорфенолов (ТеХФ).

Немаловажным было и отсутствие в донных осадках хлорированных гидрокси- и метоксифенолов, образующихся в результате окислительного дехлорирования высокозамещенных фенолов под действием акклиматизированных микробных сообществ [14]. Отсутствие этих соединений предполагало недостаточное количество в данной среде аэробных бактерий, способствующих окислительному дехлорированию хлорфенолов [15].

Как видно из результатов табл. 3, в осадках озера Тундровое-2 в количественном отношении основными соединениями были 2,4,5-ТХФ и 2,3,4,6-ТеХФ. В меньших концентрациях были найдены 2,3,4-, 2,4,6-, 3,4,5-ТХФ и 2,3,4,5-ТеХФ. Можно предположить, что присутствие этих соединений обусловлено процессами микробной деградации в донных осадках собственно ПХФ, а также атмосферным переносом этих соединений, образовавшихся в процессах сжигания/горения органического сырья. В то же время источником 2,4,5- и 2,4,6-трихлорфенолов могли быть процессы ферментативного биосинтеза в компонентах озерных экосистем [16], однако

Таблица 3

Состав хлорфенольных соединений в донных осадках исследованных озер

Озера	Хлорфенольные соединения	
	идентифицированные	концентрация, мкг/г
Тундровое-1	2,3,4-ТХФ	<0,001
	2,4,5-ТХФ	0,008
	2,4,6-ТХФ	<0,001
	3,4,5-ТХФ	<0,001
	2,3,4,5-ТеХФ	<0,001
	2,3,4,6-ТеХФ	0,007
Талатинское	2,4,5-ТХФ	<0,001
	2,4,6-ТХФ	<0,001
	3,4,5-ТХФ	0,001
	2,3,4,6-ТеХФ	<0,001
Тундровое-2	2,3,4-ТХФ	0,005
	2,4,5-ТХФ	0,111
	2,4,6-ТХФ	0,003
	3,4,5-ТХФ	0,002
	2,3,4,5-ТеХФ	0,006
	2,3,4,6-ТеХФ	0,050
	ПХФ	0,008

Примечание: < 0,001 мкг/г — ниже предела определения; ТХФ — трихлорфенол; ТеХФ — тетрахлорфенол; ПХФ — пентахлорфенол.

отсутствие низкохлорированных фенолов предполагает преобладание в озерных осадках биохимических процессов над энзиматическими.

Накоплению хлорированных фенолов в осадках данного озера благоприятствовали высокое содержание $C_{\text{орг}}$ (38,4 %) и низкие значения рН (5,79), при которых увеличивалась тенденция к образованию неионизированных форм хлорфенолов и их сорбционная способность.

Концентрации хлорфенольных соединений, обнаруженные в озере Тундровое-2, были того же порядка, что и найденные в донных осадках озер, находящихся в условиях отсутствия прямой антропогенной нагрузки [3], что показано в табл. 3. Но в общем содержании в осадках озер юга Архангельской области доминировали (60 %) низкохлорированные соединения, среди которых идентифицировались хлорированные фенолы — моно- и дихлорфенолы, представляющие собой конечные продукты микробальной трансформации и ферментативного биосинтеза [3, 4]. Вклад антропогенного ПХФ в общее содержание хлорфенольных соединений был незначительным, составляя 7–10 %. Профиль высокозамещенных ХФС в осадках этих озер был идентичным профилю соединений, найденных в осадках озера Тундровое-2. Такой профиль включал в себя как самые распространенные в окружающей среде соединения, эмиссия которых в окружающую среду связана с процессами сжигания/горения и применением биоцидов для обработки древесины, так и продукты восстановительного дехлорирования пента- и тетрахлорфенолов. Присутствие этих высокохлорированных фенолов обусловлено влиянием атмосферного переноса путем сухих высадений и влажных выпадений на почву и в водную среду. Хлорированные метокси- и гидроксифенолы в осадках озер на юго-западе Архангельской области также не были идентифицированы.

Донные осадки исследованных озер на острове Вайгач (Тундровое-1 и Талатинское) по компонентному составу обнаруженных соединений характеризовались единичными идентифицированными хлорфенолами. Низкие содержания органического углерода (1,75 и 2,83 %) и слабощелочные рН осадков не способствовали удержанию ионогенных хлорфенолов в этих осадках. Как видно из данных табл. 3, в осадках озера Тундровое-1 из семи идентифицированных соединений количественно определены только 2,4,5-ТХФ и 2,3,4,6-ТеХФ. В осадках озера Талатинское был обнаружен только 3,4,5-ТХФ — продукт анаэробного дехлорирования тетрахлорфенолов. Присутствие этих соединений в озерных осадках, скорее всего, обусловлено атмосферным переносом и биохимическими процессами анаэробной микробной деградации.

Во всех осадках исследованных озер практически все соединения были биодоступными, найденными в легкоэкстрагируемой фракции. Будучи биодоступными для микрофлоры, обнаруженные соединения подвержены абиотической и биотической деградации, что могло способствовать их разрушению. Однако, при отсутствии низкохлорированных фенолов, трихлорфенолы — промежуточные компоненты в процессе дехлорирования ПХФ [17, 18] — оставались нетрансформированными (тупиковыми), что предполагало неполную деградацию ПХФ. Возможно, это связано с отсутствием в донных осадках оптимальных условий для полной деградации полихлорфенолов (рН среды, температуры, достаточного количества микробной биомассы) [11, 15]. Исключением был 2,4,5-ТХФ, обнаруженный как легко-, так и труднобиodeградируемым в осадках озера Тундровое-2, причем в наибольших

количествах. Поскольку 2,4,5-ГХФ являлся труднобиоразлагаемым в анаэробных условиях, т.е. тупиковым в цепи превращения микробного дехлорирования, это способствовало его накоплению в озерных осадках.

Аналогичное распределение хлорфенольных соединений по фракциям характерно для озер юго-запада Архангельской области, где эти соединения были найдены преимущественно (71 %) в легкоэкстрагируемой фракции, что способствует их активной биодеградации. Выявленный широкий спектр хлорфенольных соединений свидетельствовал о том, что в данных озерах имелись оптимальные условия для протекания биохимических процессов трансформации.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований выявлено присутствие хлорфенольных соединений в малых субарктических озерах Европейского Севера. Уровень концентраций хлорфенольных соединений в осадках озера Тундровое-2 превышал содержание хлорфенольных соединений в озерах юга Архангельской области, не подверженных прямому антропогенному влиянию. Компонентный состав ХФС представлен преимущественно трихлорфенолами. Токсичный ПХФ был обнаружен в количестве 0,008 мкг/г, что сопоставимо с его содержанием в озерах, не испытывающих антропогенного воздействия.

В донных осадках исследованных озер не были обнаружены низкохлорированные фенолы, что предполагало неполное микробное дехлорирование легкоэкстрагируемых (биодоступных) высокозамещенных хлорфенолов, а также неблагоприятные в холодном климате субарктических территорий условия для протекания естественных энзиматических процессов.

Формирование хлорфенольных соединений в донных осадках озерных экосистем в Большеземельской тундре, удаленных от антропогенного воздействия, происходило за счет природных энзиматических и биохимических процессов, а также атмосферным переносом этих соединений, образующихся в процессах сжигания/горения.

Выявленное присутствие в донных осадках исследованных озер хлорфенольных соединений предполагает их распространение в окружающей среде путем атмосферного переноса от абиогенных источников, а также протекание в этих арктических водоемах естественных энзиматических и биохимических процессов.

Благодарности. Автор выражает благодарность Н.М. Кокрятской и А.Ф. Троянской за помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена за счет средств Минобрнауки РФ проект № АААА-А18-118012390167-1 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов хлора и серы в экосистемах Арктики и Субарктики под влиянием природных и техногенных факторов».

Acknowledgments. The author is grateful to N. Kokryatskaya and A. Troyanskaya for their assistance in the preparation of the article.

The work was carried out at the expense of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation project АААА-А18-118012390167-1 “Study of the patterns of biogeochemical processes of chlorine and sulfur cycles in the ecosystems of the Arctic and Subarctic under the influence of natural and man-made factors.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lyytikainen M.* Environmental fate and bioavailability of wood preservatives in freshwater sediments near an old sawmill site // *Chemosphere*. 2001. V. 44. P. 341–350.
2. *Suntio L., Shiu W., Mackay D.* A review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents // *Chemosphere*. 1988. V. 17. P. 1249–1290.
3. *Троянская А.Ф., Колпакова Е.С., Никитина И.А., Королева Т.А.* Хлорфенольные соединения в донных осадках озер Кенозерского национального парка // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции по анализу объектов окружающей среды «Экоаналитика – 2011». Архангельск, 2011. С. 270.
4. *Колпакова Е.С., Вахрамеева Е.А., Швецова Н.В.* Хлороорганические соединения в экосистемах Кенозерского национального парка // Тезисы докладов научной конференции «Вклад особо охраняемых природных территорий Архангельской области в сохранении природного и культурного наследия». Архангельск, 2017. С. 56–58.
5. *McAllister A., Hung L., Trevors T.* Microbial degradation of pentachlorophenol // *Biodegradation*. 1996. V. 7. № 1. P. 1–40.
6. *Шевченко В.П., Любас А.А., Стародымова Д.П., Болотов И.Н., Аксенова О.В., Алиев Р.А., Гофаров М.Ю., Игловский С.А., Кокрятская Н.М.* Особенности геохимии тяжелых металлов в донных осадках малых озер урочища Пымвашор (Большеземельская тундра) // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 1. С. 105–110.
7. *Троянская А.Ф., Вельямидова А.В.* Стойкие органические загрязнители в субарктических озерах на Европейском Крайнем Севере России // *Водные ресурсы*. 2017. № 4. С. 465–474.
8. ISO 14154:2005(E). Soil quality – Determination of some selected chlorophenols – Gas-chromatographic method with electron-capture detection. International standard. 2005. 15 p.
9. ISO 8245:1999. Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). International Organization of Standardization. 1999. P. 1–11.
10. *Shellenberg K., Leuenberger C., Schwarzenbach R.* Sorption of chlorinated phenols by natural sediments

REFERENCES

1. *Lyytikainen M.* Environmental fate and bioavailability of wood preservatives in freshwater sediments near an old sawmill site. *Chemosphere*. 2001, 44: 341–350.
2. *Suntio L., Shiu W., Mackay D.* A review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents. *Chemosphere*. 1988, 17: 1249–1290.
3. *Troyanskaya A.F., Kolpakova E.S., Nikitina I.A., Koroleva T.A.* *Khlorfenol' nye soedineniia v donnykh osadkakh ozer Kenozerskogo natsional'nogo parka.* Chlorophenol compounds in the bottom sediments of the lakes of the Kenozersky National Park. *Tezisy dokladov VIII Vserossiiskoi konferentsii po analizu ob'ektov okruzhaiushchei sredy "Ekoanalitika – 2011"* Abstracts of the scientific VIII All-Russian Conf. on the analysis of environmental objects "Ecoanalytics - 2011". Arkhangelsk, 2011: 270. [In Russian].
4. *Kolpakova E., Vakhrameyeva E., Shvetsova N.* *Khlororganicheskie soedineniia v ekosistemakh Kenozerskogo natsional'nogo parka.* Organochlorine compounds in the ecosystems of the Kenozersky National Park. *Tezisy dokladov nauchnoi konferentsii "Vklad osobo okhraniayemykh prirodnikh territorii Arkhangel'skoi oblasti v sokhraneni prirodnogo i kul'urnogo naslediiia"*. Abstracts of the scientific conference Contribution of the specially protected natural areas of the Arkhangelsk region to the preservation of the natural and cultural heritage. Arkhangelsk, 2017: 56–58. [In Russian].
5. *McAllister A., Hung L., Trevors T.* Microbial degradation of pentachlorophenol. *Biodegradation*. 1996, 7, 1: 1–40.
6. *Shevchenko V.P., Lyubas A.A., Starodymova D.P., Bolotov I.N., Aksenova O.V., Aliiev R.A., Gofarov M.Yu., Iglovskiy S.A., Kokrjatskaya N.M.* Geochemistry of heavy metals in bottom sediments of small lakes in Pymvashor trough (Bolshezemelskaya tundra). *Usp ekhi sovremennogo estestvoznaniia.* The successes of modern natural science. 2017, 1: 105–110. [In Russian].
7. *Troyanskaya A.F., Veliamidova A.V.* Persistent organic pollutants in subarctic lakes in the European Far North of Russia. *Vodnye resursy.* Water resources. 2017, 4: 465–474. [In Russian].
8. ISO 14154:2005(E). Soil quality – Determination of some selected chlorophenols – Gas-

- and aquifer materials // Environ. Sci. Technology. 1984. V. 18. P. 652–657.
11. Toxicological profile for pentachlorophenol. U.S. Department of health and human services // Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2001. 316 p.
12. *Гетман А.В.* От разведки — к добыче // Заполярный регион. 2008. № 2 (9). С. 10–14.
13. *Briois C., Gullett B., Ryan S., Tabor D., Touati A.* Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash // Organohalogen Compounds. 2006. V. 68. P. 850–856.
14. *Haggbloom M., Apajalanti H., Salkinoja-Salonen M.* O-Methylation of Chlorinated para-Hydroquinones by *Rhodococcus chlorophenolicus* // Applied and Environmental Microbiology. 1988. V. 54. № 7. P. 1818–1824.
15. *Field J., Sierra-Alvarez R.* Biodegradability of chlorinated aromatic compounds // Science dossier. Euro Chlor. July 2007. P. 15–33.
16. *Gribble G.* Natural Organohalogens // Science Dossier. Euro Chlor. October 2004. 60 p.
17. *Knuutinen J., Palm H., Hakala H.* Polychlorinated phenols and their metabolites in soil and earthworms of sawmill environment // Chemosphere. 1990. V. 20. № 6. P. 609–623.
18. *Gaofeng W., Hong X., Mei J.* Biodegradation of chlorophenols: a review // Chemical journal on Internet. 2004. V. 6. № 10. 67 p.
- chromatographic method with electron-capture detection. International standard. ISO, 2005: 15 p.
9. ISO 8245:1999. Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). International Organization of Standardization. ISO, 1999: 1–11.
10. *Shellenberg K., Leuenberger C., Schwarzenbach R.* Sorption of chlorinated phenols by natural sediments and aquifer materials. Environ. Sci. Technology. 1984, 18: 652–657.
11. Toxicological profile for pentachlorophenol. U.S. Department of health and human services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2001: 316 p.
12. *Getman A.V.* From exploration to extraction. *Zapoliarnyi region*. Polar region. 2008, 2 (9): 10–14. [In Russian].
13. *Briois C., Gullett B., Ryan S., Tabor D., Touati A.* Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash. Organohalogen Compounds. 2006, 68: 850–856.
14. *Haggbloom M., Apajalanti H., Salkinoja-Salonen M.* O-Methylation of Chlorinated para-Hydroquinones by *Rhodococcus chlorophenolicus*. Applied and Environmental Microbiology. 1988, 54, 7: 1818–1824.
15. *Field J., Sierra-Alvarez R.* Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier. Euro Chlor, July 2007: 15–33.
16. *Gribble G.* Natural Organohalogens. Science Dossier. Euro Chlor. October 2004: 60 p.
17. *Knuutinen J., Palm H., Hakala H.* Polychlorinated phenols and their metabolites in soil and earthworms of sawmill environment. Chemosphere. 1990, 20, 6: 609–623.
18. *Gaofeng W., Hong X., Mei J.* Biodegradation of chlorophenols: a review. Chemical journal on Internet. 2004, 6, 10: 67 p.