УДК 504.4054+504.054(1/9)

DOI: 10.15372/KhUR2022423

EDN: GXANGK

Изучение поведения стойких органических загрязнителей в Байкал-Селенгинской экосистеме как элемент выполнения Стокгольмской конвенции

С. В. МОРОЗОВ[1], Г. С. ШИРАПОВА[2], О. А. ЕРМОЛАЕВА[1], Е. И. ЧЕРНЯК[1], Н. И. ТКАЧЕВА[1], В. Б. БАТОЕВ[2], Д. М. МОГНОНОВ[2]

[1]*Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск (Россия)*

E-mail: morozov@nioch.nsc.ru

[2]*Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ (Россия)*

Аннотация

В работе представлены обобщающие результаты многолетнего изучения (1994–2020 гг.) поведения стойких органических загрязнителей (СОЗ) в уникальной Байкал-Селенгинской озерно-речной экосистеме на территории России и Монголии. Исследования были начаты в 1993 г. по инициативе В. А. Коптюга сотрудниками Новосибирского института органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН (Новосибирск) и Байкальского института природопользования СО РАН (Удан-Удэ) и проводились в рамках российских и международных экспедиций. В результате анализа полученных методом хромато-масс-спектрометрии данных выявлены некоторые закономерности поступления, распределения и аккумуляции СОЗ в различных районах Байкал-Селенгинской водной экосистемы, которая представляет собой крупнейшую озерно-речную систему Внутренней Азии. Получены детальные данные по содержанию, распространению и профилям хлорорганических пестицидов, полихлорированных бифенилов и полициклических ароматических углеводородов в поверхностных водах, донных отложениях и биоте. Исследования проведены на всей территории Байкал-Селенгинской экосистемы: оз. Байкал, дельта р. Селенги, бассейн р. Селенги на территории России и Монголии, включая промышленные районы и особо охраняемые природные территории. Полученные данные являются оценкой современного экологического состояния Байкал-Селенгинского региона и могут служить основой для выявления антропогенного воздействия на окружающую среду и здоровье населения с оценкой экологического риска. Эти данные могут быть использованы для разработки подходов для управления качеством окружающей среды и рациональным использованием природных ресурсов, для сохранения уникального биоразнообразия и устойчивого развития территории Байкальского региона, а также могут рассматриваться как элемент выполнения Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Ключевые слова: стойкие органические загрязнители, хромато-масс-спектрометрия, хроматографические профили, биоаккумулятивная модель, оценка риска, озеро Байкал, бассейн реки Селенги

ВВЕДЕНИЕ

Крупнейшая озерно-речная экосистема Внутренней Азии, включающая оз. Байкал (Россия), оз. Хубсугул (Монголия) и бассейн р. Селенги (Байкал-Селенгинская водная экосистема) находится в центре евразийского континента на территории России и Монголии. Озеро Байкал, входящее в эту систему, является крупнейшим в мире пресноводным водоемом с уникальной эндемичной флорой и фауной. Для Байкал-Селенгинской водной экосистемы впервые предпринята попытка системного рассмотрения поведения стойких органических загрязнителей (СОЗ) в воде, донных осадках и биоте. Во время интенсивного развития сельского хозяйства и про-

© Морозов С. В., Ширапова Г. С., Ермолаева О. А., Черняк Е. И., Ткачева Н. И., Батоев В. Б., Могнонов Д. М., 2022

мышленности на территориях обеих стран, а также возможного строительства ГЭС в бассейне р. Селенги на территории Монголии это становится актуальной задачей. Кроме того, изменения климата, обусловленные переменами в земной атмосфере, могут оказать существенное влияние на физико-химические процессы антропогенных загрязнителей в объектах Байкал-Селенгинской водной экосистемы. Научные и практические вопросы обоснования и разработки комплексного мониторинга состояния оз. Байкал, анализа и прогнозирования состояния экосистемы озера находятся в центре внимания ученых и специалистов, занимающихся исследованием уникальной экосистемы озера и других экосистем Прибайкалья [1–3].

Интерес исследователей к проблеме СОЗ в экосистеме бассейна оз. Байкал возник примерно в конце 1990-х гг. Были получены данные по уровням содержания СОЗ в различных объектах окружающей среды – в атмосферном воздухе, в поверхностных и глубинных водах, почвах, донных отложениях [4–14], в организме байкальской нерпы [14, 15], в тканях птиц [16, 17]. Получены данные о распределении СОЗ в некоторых пищевых цепях Байкала [18]. Однако следует отметить, что системных исследований, охватывающих поведение СОЗ на всей Байкал-Селенгинской озерно-речной экосистеме на территории России и Монголии, практически не было.

В 1996 г. оз. Байкал получило статус объекта Всемирного природного наследия и признано Комитетом по всемирному наследию ЮНЕСКО примером выдающейся водной экосистемы. Особый статус Байкала установлен Федеральным законом № 94-ФЗ “Об охране озера Байкал” [19], в котором определена Байкальская природная территория с тремя экологическими зонами: центральная, буферная и экологическая зона атмосферного влияния.

Огромная заслуга во включении оз. Байкал в Список участков мирового природного наследия принадлежит В. А. Коптюгу. При его поддержке к началу 1990-х гг. на базе Лимнологического института СО РАН (Иркутск) заработал Байкальский международный центр экологических исследований (BICER), в котором ученые разных стран совместно с российскими учеными могли проводить всесторонние исследования оз. Байкал. В сентябре 1993 г. на заседании Консультативного совета по устойчивому развитию при Генеральном секретаре ООН В. А. Коптюг предложил рассматривать оз. Байкал в качестве модельной территории всемирного значения [20]. В сентябре 1994 г. по его инициативе в Улан-Удэ состоялось первое Международное рабочее совещание “Байкальский регион как мировая модель устойчивого развития”, в решении которого в концентрированном виде нашли отражение многие идеи и формулировки, высказанные в разные годы В. А. Коптюгом в процессе его работы по защите Байкала [21]. Развивая идеи В. А. Коптюга, а также с целью координации деятельности Сибирского отделения РАН и повышения эффективности работы по исследованию и охране Байкала, постановлением Президиума СО РАН в 2002 г. создан Научный совет СО РАН по проблемам озера Байкал. Важность сохранения уникального озера отражена в постановлении Правительства РФ № 847 от 21 августа 2012 г. «О федеральной целевой программе “Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы”». В рамках Национального проекта “Экология” реализуется федеральный проект “Сохранение озера Байкал” (сроки реализации проекта 01.01.2019 – 31.12.2024), который направлен на сохранение и восстановление биоресурсного потенциала и биологического разнообразия водных объектов Байкальской природной территории, снижение антропогенной нагрузки на экосистему оз. Байкал, а также на сокращение объемов сбросов загрязненных сточных вод в водные объекты Байкальской природной территории.

Для принятия эффективных мер по сохранению экосистемы оз. Байкал, установления закономерностей поступления, распределения и накопления загрязнителей необходима достоверная систематическая информация об уровнях загрязнения объектов окружающей среды и биоты как оз. Байкал, так и всей озерно-речной экосистемы Восточной Азии на территории России и Монголии, а также анализ путей поступления СОЗ в озеро. Стойкие органические загрязнители заслуживают особого внимания, поскольку способны к трансграничному переносу, длительно сохраняться в окружающей среде, накапливаться в гидробионтах и пищевых цепях и вызывать серьезные риски здоровью человека и экосистем в целом даже в низких концентрациях. Обращение со СОЗ регулируется требованиями Стокгольмской конвенцией о СОЗ, принятой в Стокгольме 22 мая 2001 г. [22] и ратифицированной Российской Федерацией в 2011 г. [23]. К обязательствам по выполнению Конвенции в качестве мер по предотвращению

загрязнения СОЗ (статья 11 Конвенции) относится осуществление научных исследований, разработок, мониторинга и сотрудничества в отношении СОЗ по таким, в частности, вопросам: выявление уровней их содержания в окружающей среде и соответствующие тенденции; перенос в окружающей среде, "судьба" и преобразование; воздействие на здоровье человека и окружающую среду и т. д.

Кроме того, следует отметить, что на сегодняшний день недостаточно понятна роль климатических факторов в процессах поступления, распределения и аккумуляции СОЗ в объектах окружающей среды. Существует предположение, что глобальное потепление может повлиять на баланс и механизмы поведения СОЗ в окружающей среде, однако экспериментальные данные по этому вопросу пока отсутствуют [24]. Основная рекомендация Стокгольмской конвенции в этой части – продолжение исследований климатических факторов и трендов СОЗ с целью установления более понятных взаимосвязей между этими явлениями [25].

В рамках региональной научно-технической программы "Сибирь" и федеральной целевой программы "Экологическая безопасность России" В. А. Коптюг в 1993 г. предложил организовать на базе Новосибирского института органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН (НИОХ СО РАН, Новосибирск) и Байкальского института природопользования СО РАН (БИП СО РАН, Удан-Удэ) совместные исследования по изучению закономерностей поступления, распределения и аккумуляции СОЗ в экосистеме оз. Байкал и р. Селенги. Работа проводилась при поддержке экспедиционных грантов СО РАН, грантов Российского фонда фундаментальных исследований, грантов различных федеральных целевых программ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования для определения уровней содержания СОЗ в водных экосистемах оз. Байкал и бассейна р. Селенги на территории России и Монголии служили пробы поверхностной воды, прибрежные донные отложения, экземпляры двустворчатого моллюска *Colletopterum*, плотвы *Rutilus*, щуки *Esox lucius* и сома *Silurus glanic*.

Образцы проб поверхностной воды консервировали добавлением конц. HCl из расчета 1 мл кислоты на 1 л воды. Образцы донных отложений отбирали с приповерхностного слоя до 10 см с помощью дночерпателя (Wildlife Suply Company, США). Образцы высушивали при комнатной температуре и просеивали через сито с размером ячеек 0.4 мм.

Пробоподготовка донных отложений (5 г) и поверхностной воды (2 л) состояла в экстракции СОЗ дихлорметаном и очистке полученных экстрактов на колонке с активированным оксидом алюминия. Перед экстракцией к образцам добавляли суррогатный стандарт.

Пробоподготовка биологических проб (5 г) заключалась в гомогенизации мягких тканей образцов моллюска и печени рыб и двукратной ультразвуковой экстракции смесью гексан/ацетон (1 : 2 по объему), очистке полученных экстрактов конц. H_2SO_4 и фракционированием через колонку с активированным оксидом алюминия. Перед экстракцией к образцам добавляли суррогатный стандарт. Полученные экстракты подвергали концентрированию при пониженном давлении и температуре 40–45 °C и растворяли в 1 мл ацетона.

Подготовленные образцы анализировали методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) с использованием газового хроматографа GC 6890N с масс-селективным детектором MSD 5975N и автоматическим пробоотборником 7683B (Agilent Technologies, США) в режиме селективного ионного мониторинга (SIM) по трем индивидуальным характеристичным ионам определяемых соединений [26–28]. Анализируемые компоненты разделяли на капиллярной кварцевой колонке HP-5 MS длиной 30 м, диаметром 0.25 мм и толщиной покрытия 0.25 мкм. Условия хроматографирования: температура детектора 280 °C, температура источника ионов 230 °C, температура квадруполя 150 °C, газ-носитель – гелий, объем вводимой пробы 1 мкл. Температурный режим термостата колонки: при 50 °C (2 мин), подъем от 50 до 280 °C (10 °C/мин), при 280 °C (20 мин).

В полученных экстрактах определяли полихлорированные бифенилы (ПХБ – тетра-, пента- и гексахлорированные изомеры), хлорорганические пестициды (ХОП – ДДТ и его метаболиты ДДЕ и ДДД, изомеры ГХЦГ (α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, δ-ГХЦГ)), гексахлорбензол, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ – нафталин, аценафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(a)антрацен, хризен, бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, бенз(j)флуорантен, бенз(e)пирен, бенз(a)пирен, перилен, дибенз(a,h)антрацен, бенз(g,h,i)перилен, индено(1,2,3-c,d)пирен).

Для количественных измерений применяли стандартные образцы смесей ПАУ, ХОП и ПХБ: НР № 8500-6035, НР № 8500-6011, ГОСТ 7821-2000, нефтепродукты ГСО 7950-2001, фенолы НР № 8500-6083, НР № 8500-6084. Пределы обнаружения СОЗ: 0.2 нг/л для воды; 0.5 нг/г для донных отложений; 0.5 нг/г для биоты. Погрешности определения СОЗ: 25 % для воды; 20 % для донных отложений; 30 % для биоты. В качестве суррогатных стандартов (“свидетели”) использовали 4,4′-дибромфенил и 9,10-ди(тридейтерометил)фенантрен.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках совместных российских, российско-монгольских, российско-корейско-монгольских и российско-монгольско-японских (1994–2017 гг.) экспедиций проведены исследования поступления, накопления и распределения СОЗ, а также идентифицированы их основные источники поступления в водные экосистемы бассейна оз. Байкал и р. Селенги на территории Монголии и России (рис. 1).

Методом ГХ-МС с использованием детектирования по индивидуальным характеристичным ионам и по полному ионному току и методологии многовекторного хроматографического профилирования [29, 30] определено содержание СОЗ в поверхностных и подземных водах, донных осадках и биоиндикаторных организмах (двустворчатые моллюски *Colletopterum*, плотва *Rutilus*, щука *Esox lucius*, сом *Silurus glanic*) бассейна оз. Байкал и р. Селенги на территории России и Монголии. Получены хроматографические профили (fingerprint), определены детальные составы и современные уровни содержания СОЗ в различных объектах окружающей среды [31–38].

Установлены характерные загрязняющие вещества для южной, центральной и северной частей оз. Байкал (рис. 2), коэффициенты биоконцентрирования ХОП, ПХБ и ПАУ, распределение легких и тяжелых ПАУ, изомеров ПХБ, характерные хроматографические профили алифатических углеводородов в воде, донных осадках и жире нерпы, определяющих уровни антропогенного и природного загрязнения, а также возможные источники их поступления в объекты окружающей среды [38–41]. Из полученных данных следует, что в южной части оз. Байкал преобладают фенолы, ПАУ и нефте-

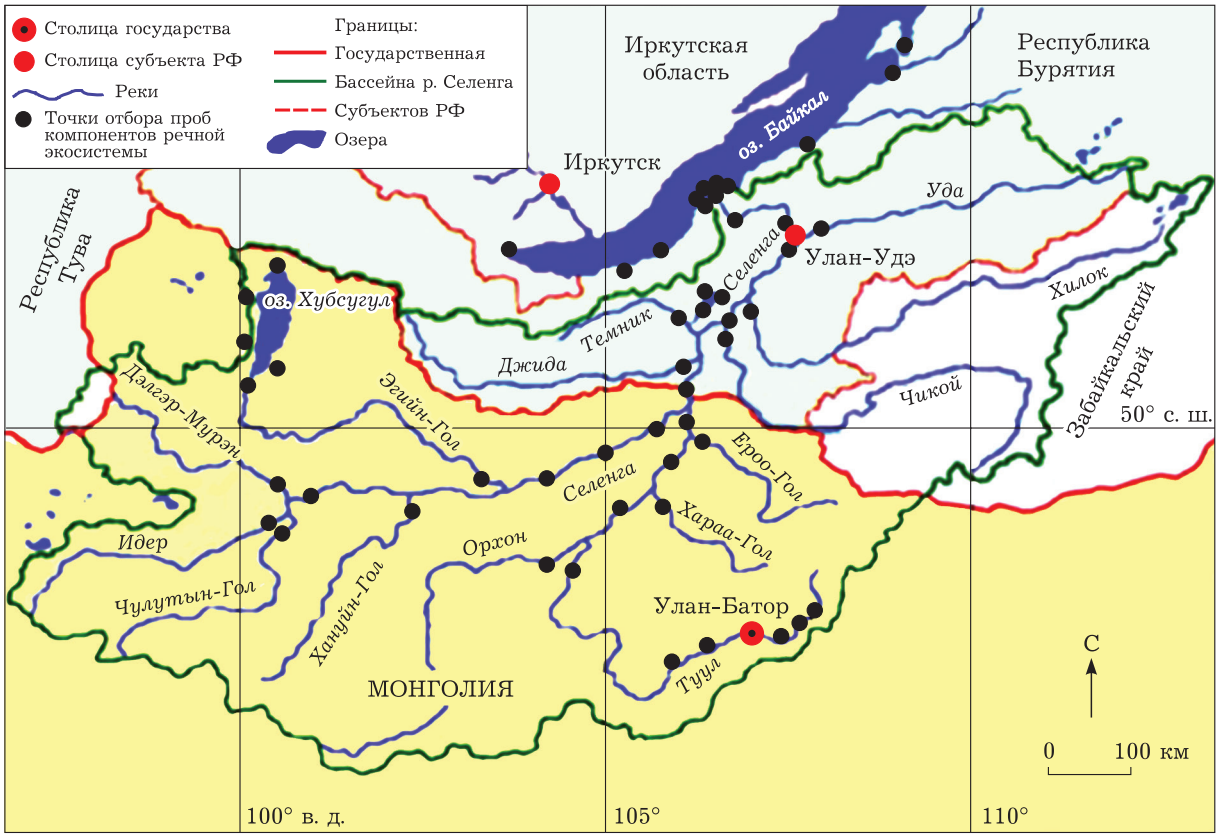

Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб в бассейне р. Селенги на территории России и Монголии.

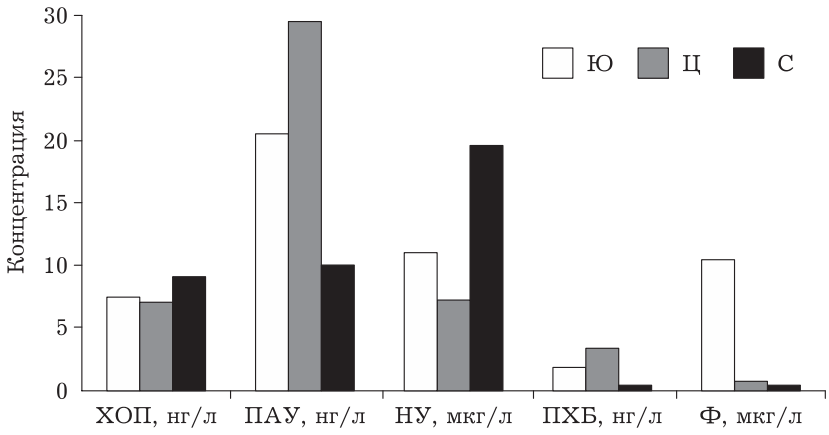

Рис. 2. Содержание органических загрязняющих веществ в южной (Ю), центральной (Ц) и северной (С) частях оз. Байкал [38]. Здесь и на рис. 3, 4, 6, 10, 11: ХОП – хлорорганические пестициды; ПАУ – полициклические ароматические углеводороды; ПХБ – полихлорированные бифенилы; НУ –нефтяные углеводороды; Ф – фенолы.

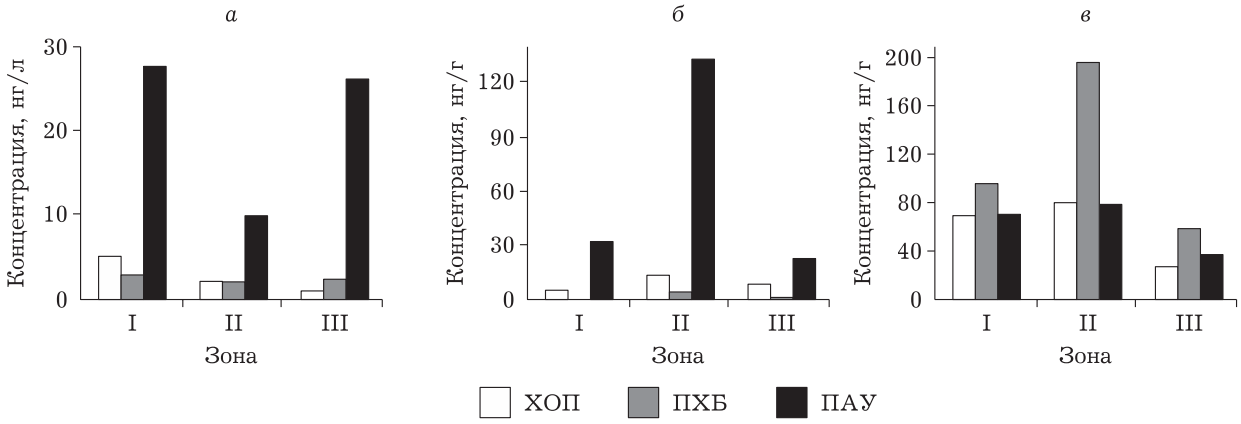

Рис. 3. Распределение ХОП, ПХБ и ПАУ в поверхностной воде (*а*), донных осадках (*б*) и биоте (*в*) в бассейне р. Селенги в зонах I (территория Монголии), II (территория России), III (дельта р. Селенги) [38].

продукты, что обусловлено, по всей вероятности, выбросами Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, предприятий теплоэнергетики и транспорта. В центральной части преобладают ПАУ и ПХБ, что может быть связано с выбросами комплекса предприятий Иркутско-Черемховской промышленной зоны. В северной части преобладают нефтяные углеводороды, что может быть связано с работой транспортных предприятий. Содержание ХОП в южной, центральной и северной частях оз. Байкал примерно одинаково и соответствует, по-видимому, фоновым значениям.

Исследованы процессы хемодинамики СОЗ для Байкал-Селенгинской водной экосистемы (рис. 3). Установлено, что в российской части бассейна р. Селенги происходит “разгрузка” СОЗ, поступающих с монгольской стороны [34–37].

Дельта р. Селенги входит в центральную экологическую зону Байкальской природной территории и представляет собой водно-луговоболотную зону с протоками, регулирующую чистоту вод Байкала и сохраняющую биоразнообразие экосистемы. Проведено исследование распределения ХОП, ПХБ и ПАУ в поверхностной воде и донных отложениях дельты р. Селенги в трех зонах: I – от г. Улан-Уде до с. Творогово, II – глубокая часть дельты (с. Степной Дворец, протоки Заверяниха и Глубокая), III – территория Дельтового прогиба на выходе основных проток дельты в оз. Байкал. Впервые установлено, что дельта р. Селенги является естественным биогеохимическим биофильтром в процессе самоочищения экосистемы оз. Байкал в отношении СОЗ [42] (рис. 4). Анализ характерных соотношений ПАУ [43–45] показал, что

источники поступления ПАУ в дельту р. Селенги имеют пиролитическую природу и связаны в основном со сжиганием нефтепродуктов (рис. 5).

В результате исследований по содержанию основных СОЗ в природной воде и донных осадках в бассейне р. Селенги в основных промышленных районах Монголии и на фоновых территориях в период с 2007 по 2015 гг. показано, что:

– уровни содержания ПАУ в объектах окружающей среды промышленных районов Монголии достоверно существенно превышают значения, полученные на фоновых территориях, что, очевидно, обусловлено антропогенными факторами (рис. 6);

– донные осадки являются более надежными и адекватными индикаторами для оценки масштабов и источников антропогенного загрязнения водных экосистем;

– оз. Хубсугул, находящееся на территории национального парка, может быть использовано как фоновая территория для выявления зон повышенной антропогенной нагрузки в Байкал-Селенгинской водной экосистеме;

– полициклические ароматические углеводороды поступают в экосистему бассейна р. Селенга на территории Монголии преимущественно за счет пиролитических процессов, связанных со сжиганием угля, нефтепродуктов и древесины, что следует из анализа характерных соотношений маркерных ПАУ [38] (рис. 7);

– с большой вероятностью ДДТ в настоящее время на обследованных территориях масштабно не применяются, что следует из анализа профилей и соотношений ДДТ, ДДЕ и ДДД [46];

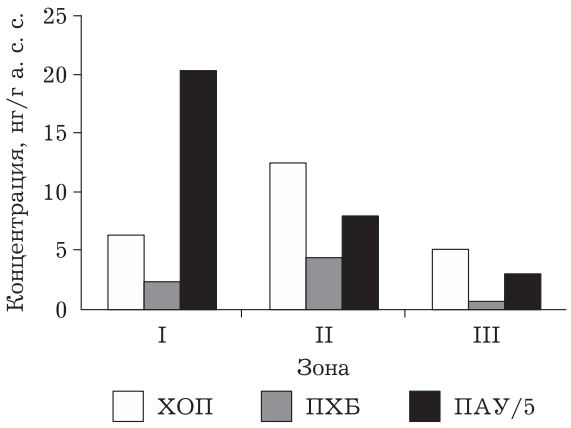

Рис. 4. Распределение стойких органических загрязнителей в донных отложениях дельты р. Селенги, а. с. с. – абсолютно сухое сырье.

– уровни содержания ХОП и ПХБ на обследованных территориях несколько превышают значения, полученные на фоновых территориях, что может быть обусловлено как трансграничным переносом, так и локальными источниками [39, 40] (см. рис. 6).

Получены хроматографические профили и определены детальные составы полиароматических и алифатических углеводородов, реликтовых биомаркеров нефти (гопаны и стераны) в воде и донных осадках оз. Байкал в зоне выхода природной нефти (Баргузинский залив).

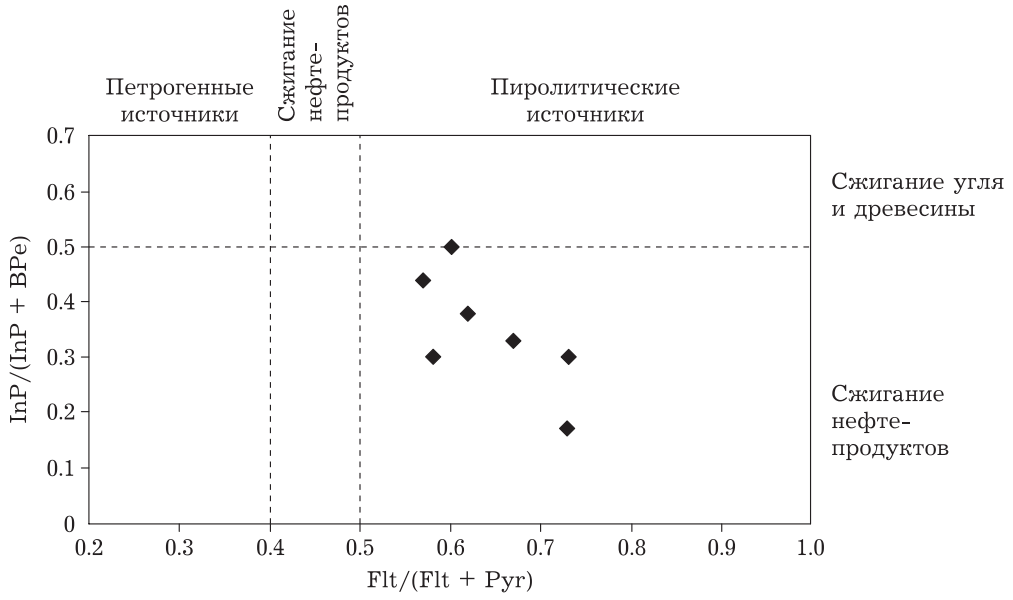

Рис. 5. Источники поступления полициклических ароматических углеводородов в донные осадки дельты р. Селенги и оз. Байкал.

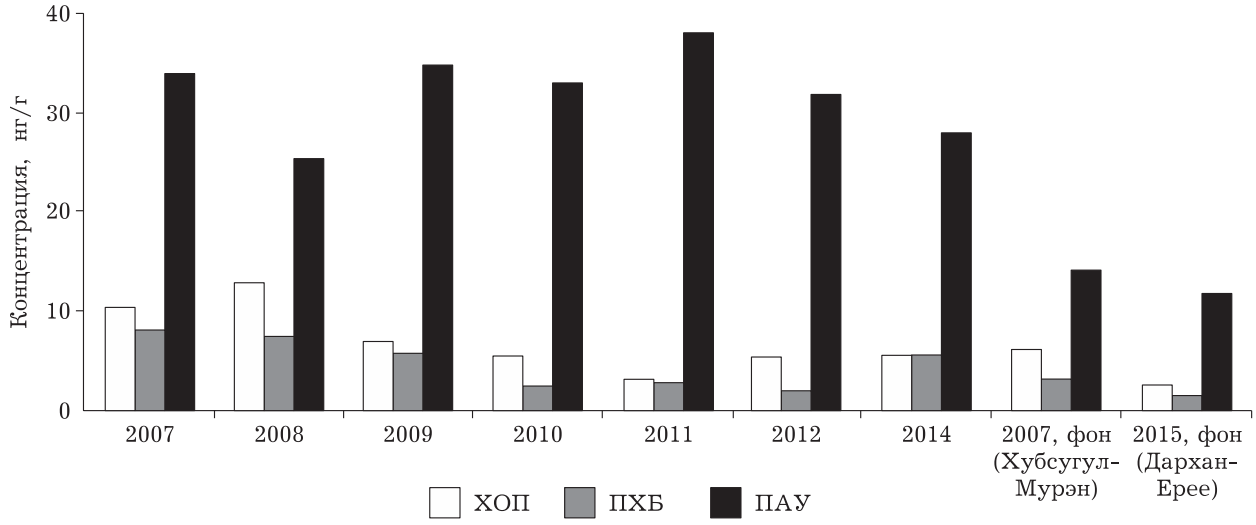

Рис. 6. Содержание основных стойких органических загрязнителей в донных осадках в бассейне р. Селенги в основных промышленных районах Монголии и на фоновых территориях в период с 2007 по 2015 гг.

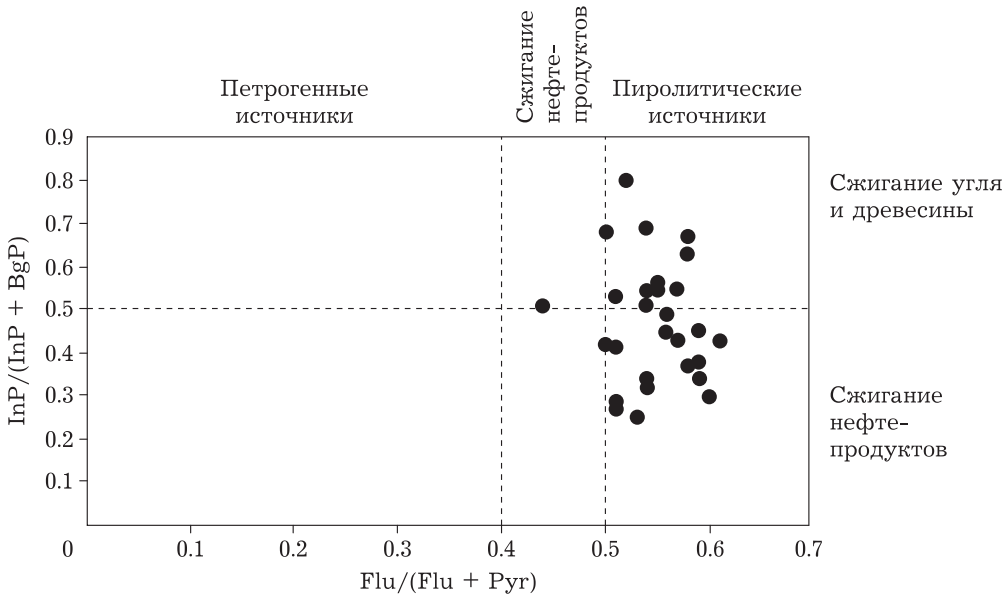

Рис. 7. Источники поступления полициклических ароматических углеводородов в донные осадки бассейна р. Селенги на территории Монголии.

Для анализа происхождения ПАУ были использованы соотношения индивидуальных ПАУ, позволяющие идентифицировать источники их поступления в окружающую среду. Полученные значения соотношений для прибрежных донных осадков, образцы которых отобраны в районе мыса Горевой Утес и в Баргузинском заливе оз. Байкал, свидетельствуют о наличии локальных источников преимущественно петрогенной природы (рис. 8).

Методом ГХ-МС с использованием реконструкции хроматограмм по характеристичным ионам и многовекторного хроматографического профилирования проведено исследование содержания и профилей ПХБ в пробах природной поверхностной воды и донных осадков на территории Байкал-Селенгинской экосистемы: бассейн р. Селенги от границы с Монголией до дельты, оз. Гусиное и залив Сор-Черкалов.

Установлено, что наибольшее содержание ПХБ в поверхностной воде и донных осадках характерно для проб, отобранных в буферной экологической зоне (р. Селенга и оз. Гусиное) вблизи основных источников загрязняющих веществ (г. Улан-Удэ, пос. Селенгинск, Гусиноозер-

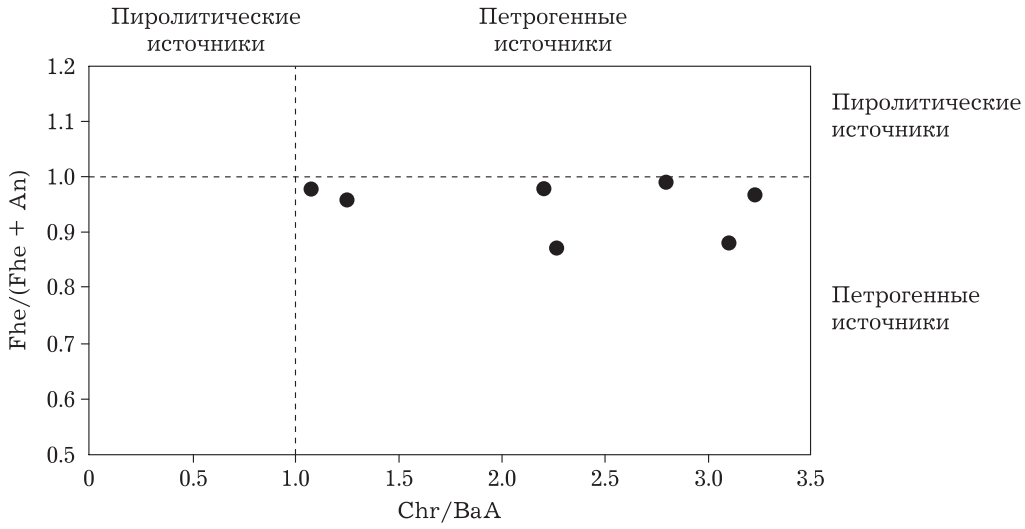

Рис. 8. Источники поступления полициклических ароматических углеводородов в донные осадки Баргузинского залива оз. Байкал.

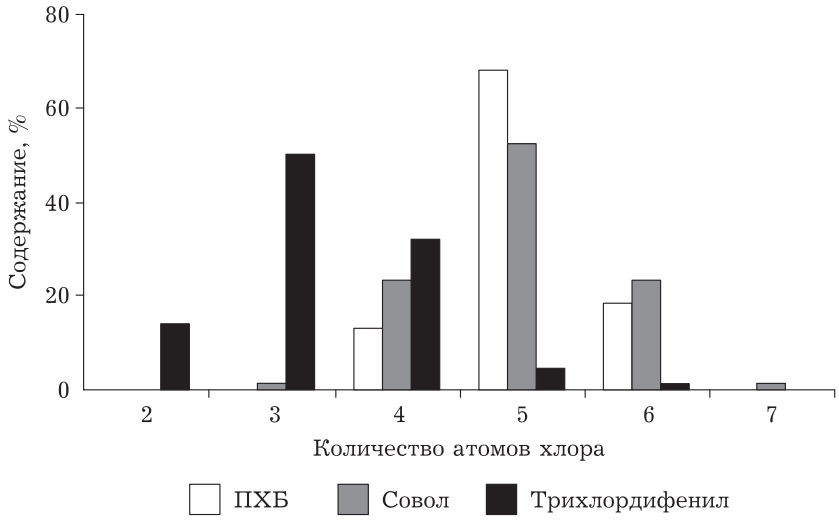

Рис. 9. Диаграмма соотношений полихлорбифенилов (ПХБ) в образце донных отложений оз. Гусиное и технических смесей ПХБ [32].

ская ГРЭС). Донные отложения используются в качестве индикатора для выявления состава, интенсивности и масштаба техногенного загрязнения водных экосистем. Аккумулируя загрязняющие вещества, донные отложения, с одной стороны, способствуют самоочищению водной среды, с другой – являются постоянным источником ее вторичного загрязнения. В донных осадках, так же как и в поверхностной воде, наибольшее содержание ПХБ было характерно для проб, отобранных в буферной экологической зоне (пос. Селенгинск, с. Гусиное Озеро).

Установлено, что процентное соотношение тетра-, пента- и гексахлорбифенилов в исследованных образцах воды, донных отложений и биоте соответствовало составу технической смеси “Совол” (рис. 9) [32].

Таким образом, обнаруженные в водных экосистемах ПХБ имеют локальное происхождение, поскольку в спектре соединений присутствуют ПХБ с большим числом атомов хлора, а для глобального переноса характерны более летучие ПХБ с малым числом атомов хлора. Предполагаемым источником является широкое использование в Байкальском регионе электротехнического и другого оборудования, содержащего ПХБ.

В рамках исследования эндемиков оз. Байкал как биоиндикаторов его экосистемы методом ГХ-МС проведен анализ жирнокислотного

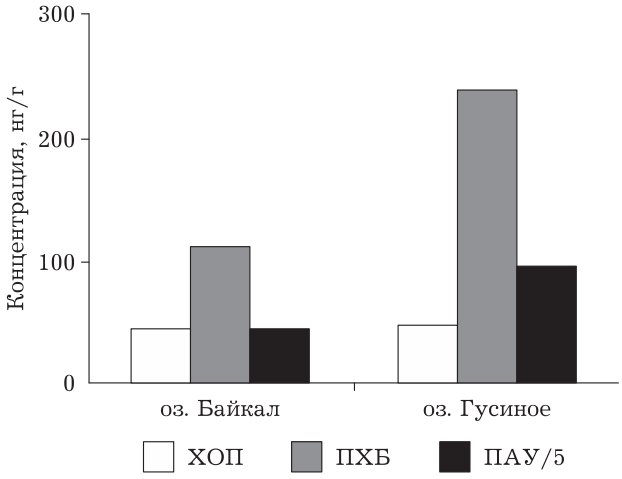

Рис. 10. Содержание ХОП, ПХБ и ПАУ в печени щуки озер Байкал и Гусиное.

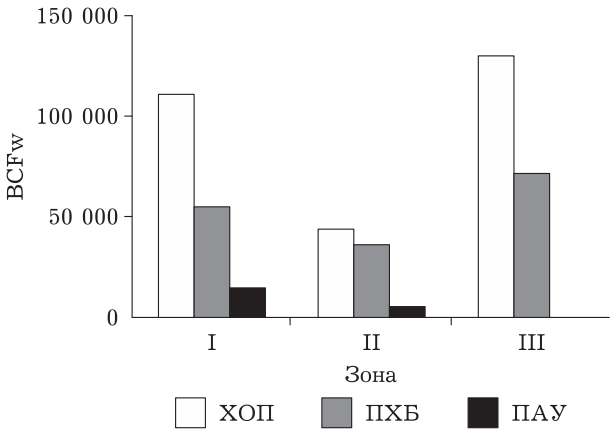

Рис. 11. Коэффициенты биоконцентрирования в воде (BCFw) для рыб-биоиндикаторов в зонах: I – промышленные районы Монголии; II – р. Селенга на территории России; III – дельта р. Селенги.

состава липидов внешнего, среднего и внутреннего жира байкальской нерпы *Pusa sibirica*. Получены данные по составу и соотношениям наиболее характерных жирных кислот липидов различных участков тела нерпы, выловленной в различных частях оз. Байкал и показано, что при переходе от внешнего к внутреннему жиру содержание мононенасыщенных жирных кислот уменьшается, а насыщенных и полиненасыщенных незаменимых жирных кислот – увеличивается [39].

Впервые для Байкал-Селенгинской водной экосистемы на территории Монголии и Бурятии разработана биоаккумулятивная модель СОЗ [47–51], которая может служить научной основой установления универсальных показателей трофического статуса водных экосистем для интегральной оценки, прогнозирования и моделирования их экологического состояния.

Получены данные (залив Сор-Черкалов, озера Байкал и Гусиное) по содержанию ХОП, ПХБ и ПАУ в мягких тканях двустворчатого моллюска *Colletopterum ponderosum sedakovi* и рыб-биоиндикаторов (рис. 10), определены коэффициенты биоконцентрирования в воде (BCFw) ХОП, ПХБ и ПАУ в диапазоне 300–4000 для двустворчатого моллюска и 40 000–130 000 для щуки и сома [52]. Полученные данные показывают, что СОЗ отвечают критериям биоаккумуляции, причем для рыб-биоиндикаторов – повышенной биоаккумуляции, при этом порядок концентраций СОЗ в биоте: ПХБ > ПАУ > ХОП (см. рис. 10). Таким образом, ПХБ является доминантным загрязнителем рыб-биоиндикаторов и, по-видимому, отражает устойчивое и интенсивное использование его в прошлом в бассейне р. Селенги.

На примере мягких тканей моллюска и печени рыб-биоиндикаторов установлен следующий порядок биоаккумуляции СОЗ: ХОП > ПХБ > ПАУ (рис. 11).

Рассчитаны факторы биоконцентрирования (BCFw биота–вода), сорбции (K_{oc} донные отложения–вода), биоаккумуляции (BSAF биота–донные осадки) и биомагнификации (BMF хищник–жертва) – основные используемые в мировой практике критерии для оценки экологического риска для водных экосистем [53]. Выбранные биоиндикаторные организмы (моллюск, сом, плотва, щука) обладают высокой и чрезвычайно высокой способностью к накоплению СОЗ (BCFw для рыб-хищников составляет 40 000–130 000) [50], а в трофических цепях происходит существенная передача СОЗ от низшего звена к высшему (BMF плотва–щука равно 4).

Показано, что, несмотря на достаточно низкие уровни содержания СОЗ в поверхностной воде и донных отложениях, в трофических цепях на высоких уровнях происходит аккумуляция СОЗ с коэффициентами, превышающими критические уровни. Выбранные биоиндикаторные организмы обладают чрезвычайно высоким потенциалом бионакопления.

Обработка полученных результатов позволяет провести качественную оценку риска, сопоставляя средние концентрации токсикантов с нормативными значениями Агентства по охране окружающей среды США или рекомендованных Всемирной организацией здравоохране-

ния, которые разработаны с учетом концепции приемлемого риска [54]. Если соотношение реальных концентраций к нормативным превышает единицу, это указывает на превышение нормативных показателей и позволит выделить ведущие индикаторные токсиканты. Кроме того, соотношение реальных концентраций к нормативным или приемлемым (IR – индекс риска) позволяет разработать критерии эколого-гигиенического ранжирования в соответствии со следующими параметрами:

1. IR < 1 – отсутствие опасности;
2. IR 1–3 – потенциальная опасность;
3. 3 < IR < 10 – опасность;
4. IR > 10 – высокая опасность.

Данные по содержанию и бионакоплению СОЗ в объектах окружающей среды и трофических цепях Байкал-Селенгинской экосистемы с учетом дозовых нагрузок и параметров канцерогенной активности СОЗ позволяют предположить, что основными факторами экологического риска для экосистем и здоровья населения являются ПХБ и ПАУ.

Полученные данные могут быть основой для выявления антропогенного воздействия на окружающую среду и население с оценкой экологического риска и разработки подходов для управления качеством окружающей среды и рациональным использованием природных ресурсов, для сохранения биоразнообразия и устойчивого развития ключевых географических зон крупнейшей озерно-речной экосистемы Внутренней Азии на территории России и Монголии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что, несмотря на достаточно низкие уровни содержания СОЗ в поверхностных водах и донных отложениях уникальной Байкал-Селенгинской озерно-речной экосистемы на территории России и Монголии, в трофических цепях происходит аккумуляция СОЗ с коэффициентами, превышающими критические уровни. Выбранные индикаторные организмы обладают чрезвычайно высокими потенциалами биоконцентрирования. Показано, что в российской части бассейна р. Селенги происходит “разгрузка” СОЗ, поступающих с монгольской территории. Заключительные процессы самоочищения происходят в дельте р. Селенги, которая является естественным биогеохимическим барьером для СОЗ.

Состав конгенеров ПХБ в образцах поверхностной воды, донных отложений и биоте соответствует составу продукта “Совол”. Основными источниками поступления ХОП и ПХБ в исследуемую экосистему являются глобальный перенос и локальные источники. Основными источниками поступления ПАУ в Байкал-Селенгинскую экосистему служат пиролитические процессы сжигания нефтепродуктов, угля и древесины, за исключением территорий выхода природной нефти, где источниками ПАУ являются петрогенные процессы. На основе полученных данных (с учетом параметров канцерогенной активности СОЗ) можно полагать, что основными факторами экологического риска для экосистемы и населения являются ПХБ и ПАУ.

Учитывая, что цель Стокгольмской конвенции – защита здоровья человека и окружающей среды от воздействия СОЗ, проведенные исследования поведения СОЗ в крупной озерно-речной экосистеме можно рассматривать как элемент выполнения Российской Федерацией Стокгольмской конвенции о СОЗ.

Реализованный подход в рамках многолетних исследований поступления, распределения и аккумуляции СОЗ в Байкал-Селенгинской озерно-речной экосистеме на территории России и Монголии позволяет выявлять критические экологические факторы и может служить основой для оценки и управления экологическими рисками для экосистем и населения, а также для формирования стратегических направлений природоохранной деятельности в регионе.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0302-2019-0005).

Все аналитические работы проведены в Испытательном аналитическом центре НИОХ СО РАН (аттестат аккредитации РОСС RU.0001.510483).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Грачев М. А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 156 с.

2 Дельта реки Селенги – естественный биофильтр и индикатор состояния озера Байкал / Отв. ред. А. К. Тулохонов, А. М. Плюснин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 314 с.

3 Самсонов Д. П., Кочетков А. И., Пасынкова Е. М., Запевалов М. А. Содержание стойких органических загрязнителей в компонентах уникальной экологической системы озера Байкал // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 105–115.

4 Мамонтов А. А., Тарасова Е. Н., Мамонтова Е. А., Кербер Е. В. Изменение содержания полихлорированных бифенилов в почвах прибрежной зоны озера Байкал в 1997–2012 гг. // Экол. химия. 2015. Т. 24, № 3. С. 129–136.

5 Горшков А. Г., Кустова О. В., Дзюба Е. В., Захарова Ю. Р., Шишлянников С. М., Хуторянский В. А. Полихлорированные бифенилы в водной экосистеме озера Байкал // Химия уст. разв. 2017. Т. 25, № 3. С. 269–278.
6 Резников С. А., Аджиев Р. А. Стойкие органические загрязняющие вещества в донных отложениях на севере оз. Байкал в районе влияния трассы Байкало-Амурской магистрали // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 87–96.
7 Никаноров А. М., Резников С. А., Матвеев А. А., Аракелян В. С., Ирха Н., Кирсо У., Пальме Л. Загрязнение донных отложений оз. Байкал полициклическими ароматическими углеводородами // Изв. Рос. акад. наук. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 105–117.
8 Kuzmin M. I., Mamontova E. A., Mamontov A. A., Tarasova E. N., McLachlan M. S. Persistent organic pollutants in the Lake Baikal region: Results of international collaboration in 1990–2000s // Organohalogen Compd. 2011. Vol. 73. P. 13–16.
9 Резников С. А., Аджиев Р. А. Стойкие органические загрязнители в донных отложениях на авандельте р. Селенги // Вода: химия и экология. 2015. № 9. С. 41–48.
10 Халиков И. С., Макаренко А. А., Левшин Д. Г., Лукьянова Н. Н., Яхрюшин В. Н. Новые данные о содержании полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях прибрежной зоны озера Байкал // Экол. химия. 2021. Т. 30, № 3. С. 117–128.
11 Резников С. А., Якунина О. В., Матвеев А. А., Лукьянова Н. Н., Богуш И. В., Аджиев Р. А. Динамика накопления полициклических ароматических углеводородов в донных биоценозах озера Байкал по результатам биогеохимического мониторинга // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 80–90.
12 Semenov M. Y., Marinaite I. I., Golobokova L. P., Khuriganova O. I., Khodzher T. V., Semenov Y. M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lake Baikal water and adjacent air layer // Chem. Ecol. 2017. Vol. 33, No. 10. P. 977–990.
13 Semenov M. Y., Marinaite I. I., Zhuchenko N. A., Silaev A. V., Vershinin K. E., Semenov Y. M. Revealing the factors affecting occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of Lake Baikal and its tributaries // Chem. Ecol. 2018. Vol. 34, No. 10. P. 925–940.
14 Mamontova E. A., Tarasova E. N., Mamontov A. A., Mamontov A. M. Freshwater seal as a source of direct and indirect increased human exposure to persistent organic pollutants in a background area // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 715 Art. 136922.
15 Nomiyama K., Hirakawa S., Eguchi A., Kanbara C., Imaeda D., Yoo J., Kunisue T., Kim E.-Y., Iwata H., Tanabe S. Toxicological assessment of polychlorinated biphenyls and their metabolites in the liver of Baikal seal (*Pusa sibirica*) // Environ. Sci. Technol. 2014. Vol. 48, No. 22. P. 13530–13539.
16 Lebedev A. T., Poliakova O. V., Karakhanova N. K., Petrosyan V. S., Renzon A. The contamination of birds with organic pollutants in the Lake Baikal region // Sci. Total Environ. 1998. Vol. 212, No. 2–3. P. 153–162.
17 Kunisue T., Minh T. B., Fukuda K., Watanabe M., Tanabe S., Titenko A. M. Seasonal variation of persistent organochlorine accumulation in birds from Lake Baikal, Russia, and the role of the South Asian region as a source of pollution for wintering migrants // Environ. Sci. Technol. 2002. Vol. 36, No. 7. P. 1396–1404.
18 Poliakova O. V., Lebedev A. T., Petrosyan V. S., Hanninen O., Renzoni A., Sawa D., Walker C. Accumulation of persistent organic pollutants in the food chain of lake Baikal // Toxicol. Environ. Chem. 2000. Vol. 75, No. 3–4. P. 235–243.
19 Федеральный закон от 01 мая 1999 г. № 99-ФЗ “Об охране озера Байкал” (ред. от 01.05.2022) [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/2157025/ (дата обращения: 05.05.2022).
20 Коптюг В. А. Всемирные модельные территории устойчивого развития / В кн.: В. А. Коптюг. Наука спасет человечество. Новосибирск, 1997. С. 134–135.
21 Koptyug V., Uppenbrink M. (Eds.). Sustainable Development of the Lake Baikal Region: A Model Territory for the World. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. 372 p.
22 Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) [Electronic resource]. URL: http://chm.pops.int/theconvention/overview/textoftheconvention/tabid/2232/default.aspx (accessed 05.05.2022).
23 Федеральный закон от 27 июня 2011 г. № 164-ФЗ “О ратификации Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях” [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/12187282/ (дата обращения 05.05.2022).
24 Запевалов М. А. Мониторинг стойких органических загрязнителей – объективный и независимый инструмент оценки эффективности Стокгольмской конвенции о СОЗ (2001) // Хим. безопасность. 2018. Т. 2, № 2. С. 295–307.
25 UNEP/AMAP, 2011. Climate Change and POPS: Predicting the Impacts. Report of the UNEP/AMAP Expert Group. Geneva: Secretariat of the Stockholm Convention. 62 p.
26 ПНД Ф 14.1:2:3:4.204-04 (изд. 2018 г.). Методика измерений массовых концентраций хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в пробах питьевых, природных и сточных вод методом газовой хроматографии.
27 ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.61-09 (изд. 2015 г.). Методика измерений массовых долей хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в пробах почв, донных отложений, осадков сточных вод, отходов производства и потребления газохроматографическим методом с масс-селективным детектированием.
28 Method 8270D (SW-846). Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). EPA-RCA, 2018 [Electronic resource]. URL: https://www.nemi.gov/methods/method_summary/4726/ (accessed 05.05.2022).
29 Морозов С. В., Черняк Е. И., Ткачева Н. И., Пчельникова Т. Г., Лопатков А. Ю. Многовекторное хроматографическое профилирование как метод исследования стойких органических загрязнителей в объектах окружающей среды // Тез. докл. конф. “Обращение со стойкими органическими загрязнителями в России и за рубежом” (online). Новосибирск, 28–29 октября 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://web.nioch.nsc.ru/ncc2018/index.php/8-news/19-konferenciya (дата обращения: 05.05.2022).
30 Morozov S. V., Chernyak E. I., Tkacheva N. I. Chromatographic profiling as a method for studying persistent organic pollutants in the environment // V Int. Conf. “Actual Scientific & Technical Issues of Chemical Safety” (ASTICS-2020), Kazan, 6–8 October 2020. P. 62–63.
31 Ширапова Г. С., Утюжникова Н. С., Рабина О. А., Вялков А. И., Морозов С. В., Батоев В. Б. Загрязнение полиароматическими углеводородами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное // Химия уст. разв. 2013. Т. 21, № 2. С. 189–195.
32 Ширапова Г. С., Утюжникова Н. С., Рабина О. А., Вялков А. И., Морозов С. В., Батоев В. Б. Загрязнение хлорорганическими пестицидами и полихлорированными бифенилами бассейна озера Байкал: озеро Гусиное // Химия уст. разв. 2013. Т. 21, № 2. С. 197–205.

33 Palitsyna S. S., Shirapova G. S., Morozov S. V., Batoev V. B. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lake Gusinoe (Lake Baikal basin, Russia) // Int. Forum on Regional Sustainable Development of Norheast and Central Asia, Beijing, China, 8–11 June 2011. P. 380–386.

34 Mun Y., Ko I. H., Janchivdorj L., Gomboev B. O., Lee C.-H., Kang S. J., Lee C.-H. Integrated Water Management Model on the Selenge River Basin: Status Survey and Investigation (Phase 1). Seoul: Korea Environment Institute, 2008. 423 p.

35 Chu J.-M., Lee C.-H., Janchivdorj L., Gomboev B. O., Lee C.-H., Kang S. J. Integrated Water Management Model on the Selenge River Basin: Basin Assessment and Integrates Analysis (Phase 2). Seoul: Korea Environment Institute, 2009. 356 p.

36 Тулохонов А. К., Гомбоев Б. О., Могнонов Д. М., Зомонова Э. М., Хахинов В. В., Жамьянов Д. Ц.-Д., Канг С. И., Чу Д. М., Мун Ю., Пак С., Ли Ч. Х., Жанчивдорж Л., Одонцэцэг Д., Молотов В. С., Коломеец О. П., Гомбоева Р. И., Морозов С. В., Рабина О. А. Трансграничные реки: сотрудничество в решении экологических проблем / В кн.: Байкальская Азия: экономика, экология, устойчивое развитие (результаты международного сотрудничества). Отв. ред. А. К. Тулохонов. Улан-Уде: Издат. дом “ЭКОС”, 2009. С. 52–60.

37 Chu J.-M., Lee C.-H., Janchivdorj L., Gomboev B. O., Park S.-Y., Mun H.-J. Integrated Water Management Model on the Selenge River Basin: Development and Evaluation of the IWMM on the SRB (Phase 3). Seoul: Korea Environment Institute, 2010. 304 p.

38 Морозов С. В., Ширапова Г. С., Черняк Е. И., Ткачева Н. И., Батоев В. Б., Могнонов Д. М. Стойкие органические загрязнители в экосистеме озера Байкал // Химия уст. разв. 2018. Т. 26, № 3. С. 233–239.

39 Морозов С. В., Черняк Е. И., Вялков А. И., Ткачева Н. И. Анализ хроматографических профилей и индивидуально-группового состава низкомолекулярных органических веществ природного и антропогенного происхождения / В кн.: Химия ароматических, гетероциклических и природных соединений: (НИОХ СО РАН 1958–2008 гг.). Отв. ред. В. Н. Пармон. Новосибирск: Рос. акад. наук, Сиб. отдние, Новосиб. ин-т орган. химии им. Н. Н. Ворожцова, 2009. С. 737–778.

40 Морозов С. В., Черняк Е. И. Использование методов хроматографического профилирования для анализа и идентификации низкомолекулярных органических веществ природного и антропогенного происхождения // Химия уст. разв. 2011. Т. 19, № 6. С. 601–617.

41 Ok G., Shirapova G., Matafonova G., Batoev V., Lee S. H. Characteristics of PAHs, PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the sediment of Lake Baikal, Russia // Polycyclic Aromat. Compd. 2013. Vol. 33, No. 2. P. 173–192.

42 Ширапова Г. С., Морозов С. В., Батоев В. Б., Богачев М. И. Мониторинг стойких органических загрязнителей в экосистеме дельты реки Селенги // Изв. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2013. Т. 7. С. 92–98.

43 Wang Z., Stout S. Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification. Elsevier, 2007.

44 Stout S. A., Wang Z. (Eds.). Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification. 2nd ed. Elsevier, 2016.

45 Stogiannidis E., Laane R. Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: An overview of possibilities // Rev. Environ. Contam. Toxicol. 2015. Vol. 234. P. 49–133.

46 Коноплев А. В., Волкова Е. Ф., Кочетков А. И., Первунина Р. И., Самсонов Д. П. Мониторинг стойких органических загрязнителей в атмосферном воздухе как элемент выполнения Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях // Хим. физика. 2012. Т. 31, № 10. С. 38–45.

47 Schäfer S., Buchmeier G., Claus E., Duester L., Heininger P., Körner A., Mayer P., Paschke A., Rauert C., Reifferscheid G., Rüdel H., Schlechtriem C., Schröter-Kermani C., Schudoma D., Smedes F., Steffen D., Vietoris F. Bioaccumulation in aquatic systems: Methodological approaches, monitoring and assessment // Environ. Sci. Eur. 2015. Vol. 27, No. 1. Art. 5.

48 Katagi T. Bioconcentration, bioaccumulation, and metabolism of pesticides in aquatic organisms // Rev. Environ. Contam. Toxicol. 2010. Vol. 204. P. 1–132.

49 Mackay D., Fraser A. Bioaccumulation of persistent organic chemicals: Mechanisms and models // Environ. Pollut. 2000. Vol. 110, No. 3. P. 375–391.

50 Gobas F. A., de Wolf W., Burkhard L. P., Verbruggen E., Plotzke K. Revisiting bioaccumulation criteria for POPs and PBT assessments // Integr. Environ. Assess. Manage. 2009. Vol. 5, No. 4. P. 624–637.

51 Утюжникова Н. С., Ширапова Г. С., Черняк Е. И., Вялков А. И., Морозов С. В., Батоев В. Б. Двустворчатый моллюск (*Colletopterum ponderosum sedakovi*) – универсальный биоиндикатор загрязнения бассейна озера Байкал стойкими органическим загрязнителями // Инженер. экология. 2011. № 11. С. 55–61.

52 Shirapova G., Morozov S. Organochlorine pesticides in Baikal bivalve mollusc *Colletopterum ponderosum sedakovi* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. Art. 042042.

53 Van der Oost R., Beyer J., Vermeulen N. P. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: A review // Environ. Toxicol. Pharmacol. 2003. Vol. 13, No. 2. P. 57–149.

54 Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.