

ИССЛЕДОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ БАЙКАЛА

УДК 911.9:504.054:547.62

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(69-76)

Ю.М. СЕМЁНОВ*, **, **М.Ю. СЕМЁНОВ*****, **В.А. СНЫТКО***, ****, **А.В. СИЛАЕВ***

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, yumsemenov@mail.ru, vsnytko@yandex.ru, anton_s@bk.ru

**Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия, yumsemenov@mail.ru

***Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, smu@mail.ru

****Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 125315, Москва, ул. Балтийская, 14, Россия, vsnytko@yandex.ru

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В БАССЕЙНЕ ОЗ. БАЙКАЛ

С целью комплексной оценки загрязнения водных объектов бассейна оз. Байкал на основе безразмерных показателей химического состава вод решались задачи поиска и апробации показателей, необходимых для определения источников и уровней загрязнения, оценки вкладов притоков в загрязнение озера и способности вод к самоочищению. Предложенная авторами методология геоэкологического мониторинга основана на выявлении связей между источниками загрязнения и объектами среды путем рассмотрения техногенного вещества объектов в качестве смесей, а вещества источников как их компонентов. Выявление пространственно-временной структуры загрязнения включает анализ ландшафтной организации бассейна озера и закономерностей распределения загрязнителей. Для обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга и отображения оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем использовались методы ландшафтного картографирования. Проведены анализ ландшафтно-геохимической дифференциации бассейна оз. Байкал и ранжирование единых показателей состава вод, связывающих их загрязнение с природными условиями. Выявлены ареалы геосистем с различной скоростью разложения органического вещества — участки акватории озера с различной способностью вод к самоочищению и участки бассейна, почвы которых обуславливают формирование вод разных типов. Полученные контуры были генерализованы в соответствии с масштабом карты пространственной дифференциации биогеохимических параметров ландшафтной организации бассейна. Максимальная интенсивность разложения органического вещества характерна для таежных темнохвойных геосистем оптимального развития подгорных, межгорных понижений и долин хр. Хамар-Дабан, минимальная — для гольцовых и подгольцовых геосистем, а также для таежных лесов западного побережья озера.

Ключевые слова: оз. Байкал, бассейн, геоэкологический мониторинг, загрязнители, источники загрязнения, метод смешения, скорость разложения органического вещества.

Yu.M. SEMENOV*, **, **M.Yu. SEMENOV*****, **V.A. SNYTKO***, ****, **A.V. SILAEV***

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, yumsemenov@mail.ru, vsnytko@yandex.ru, anton_s@bk.ru

**Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, ul. Karla Marksa, 1, Russia, yumsemenov@mail.ru

***Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, smu@mail.ru

****S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, 125315, Moscow, ul. Baltiiskaya, 14, Russia, vsnytko@yandex.ru

LANDSCAPE-ECOLOGICAL APPROACH IN IDENTIFYING DISTRIBUTION PATTERNS OF POLLUTANTS WITHIN THE LAKE BAIKAL DRAINAGE BASIN

With a view to conducting a comprehensive assessment of pollution of the water bodies within the Lake Baikal drainage basin using dimensionless indicators of the water chemical composition, the problems of identifying and testing the indicators were

dealt with, which are necessary for determining the sources and levels of pollution and assessing the contributions of the tributaries to lake pollution and the self-cleaning ability of the waters. The methodology of geoecological monitoring as suggested by these authors is based on identifying correlations between polluters and environmental sites by examining technogenic material of from the sites as mixtures, and material from the sources as their components. Identification of the spatio-temporal structure of pollution involves analyzing the landscape organization of the lake drainage basin and the distribution patterns of pollutants. Substantiation of the observation and monitoring network, extrapolation of monitoring results and display of real-time data used landscape mapping methods. An analysis was made of the landscape and geochemical differentiation of the Lake Baikal drainage basin, and the unified indicators of water composition relating water pollution to natural conditions were ranked. The study revealed areas of geosystems with different rates of organic matter decomposition, i.e. the water areas of the lake with a different self-cleaning ability of the waters, and the areas of the drainage basin, the soils of which are responsible for the formation of waters of different types. The resulting contours were generalized in accordance with the scale of the map for the spatial differentiation of biogeochemical parameters of the landscape organization of the drainage basin. The highest decomposition rate of organic matter is characteristic for taiga dark-coniferous geosystems of optimal development, submontane and intermontane depressions and valleys of Khamar-Daban Range, and the lowest rate is typical for goletz and subgoletz geosystems as well as for taiga forests along the western coast of Lake Baikal.

Keywords: *Baikal, basin, geoecological monitoring, pollutants, sources of pollution, method of mixing, decomposition rate of organic matter.*

ВВЕДЕНИЕ

Разработка технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды в целях предотвращения ее загрязнения и минимизации экологических рисков — одна из важнейших задач прикладной географии и геоэкологии. Для достижения цели мониторинга — предупреждение негативных последствий воздействия человека на природу — необходимо определить источники воздействия и выявить тенденции изменения среды в целом. Однако четкие алгоритмы выявления источников и прогнозирования комплексных изменений среды отсутствуют.

Байкал — не только уникальный природный объект, но и крупнейший резервуар питьевой воды в регионе, поэтому определение источников и путей поступления загрязнителей в озеро является актуальной задачей. Особенно остро сейчас стоят вопросы выявления источников полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), путей их поступления и трансформации в водах Байкала и его притоков.

Усиление аридности климата Восточной Сибири приводит к возникновению новых источников ПАУ (пожары, выделение ПАУ при нагревании асфальтов, битумов, испарение ПАУ в хранилищах нефтепродуктов и т. д.), а также к изменению скорости и путей миграции ПАУ с водными и воздушными потоками в масштабах от локального до регионального. Понижение водности рек и уровня Байкала, наблюдаемое в последние годы, привело к увеличению концентрации ПАУ и других загрязнителей в воде. Поэтому для выработки мер по снижению содержания загрязнителей в поверхностных и грунтовых водах бассейна оз. Байкал и предотвращению негативного воздействия загрязнителей на здоровье жителей региона необходимо выявить пространственно-временную структуру загрязнения бассейна озера на основе анализа его ландшафтной организации и закономерности распределения загрязнителей.

Исследования проводятся с использованием методологии комплексного геоэкологического мониторинга, основанной на выявлении источников вещества и наблюдении связей между ними и объектами среды путем рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников — в качестве их компонентов. Впервые наблюдение связей имеет не только качественный аспект — установление путей миграции вещества от источника к рецептору, но и количественный — определение соотношения между количествами вещества источников в рецепторе.

Несмотря на большое число публикаций, посвященных загрязнению воды и донных осадков Байкала [1–3], источники и пути их поступления в озеро до сих пор остаются невыясненными. Обычно считается, что источник, расположенный непосредственно на берегу озера или его притока, — главный загрязнитель прилегающей акватории [4, 5]. Результаты наших исследований показали, что кажущаяся очевидной связь между источником и загрязнителем нередко отсутствует [6].

Наибольшее внимание в публикациях уделено загрязнению воды и донных осадков Байкала ПАУ [7, 8]. Популярность ПАУ как объекта исследования обусловлена, с одной стороны, их высокой токсичностью, а также мутагенным и канцерогенным эффектом, который они оказывают на биоту, а с другой — существующими ложными представлениями о том, что соотношение концентраций определенных изомеров ПАУ характерно для определенного вида их источников [9]. Мы установили, что выбросы каждого источника уникальны, поскольку обусловлены целым рядом факторов, а их группировка по отраслевому признаку либо по виду используемого топлива невозможна [10]. В этой связи

настоящее исследование необходимо, поскольку информация о составе выбросов источников ПАУ в бассейне Байкала отсутствует и ее необходимо реконструировать по данным о составе ПАУ в объектах среды.

Гораздо меньше внимания в публикациях о Байкале уделено происхождению в воде и донных осадках Байкала других персистентных органических загрязнителей — полихлорированных бифенилов, полихлорированных дибензо-*n*-диоксинов и дибензофуранов [5]. Их источником также считают хозяйственную деятельность человека на побережье озера без указания конкретных мест размещения источников.

Данные о загрязнении воды Байкала тяжелыми металлами и об их происхождении также противоречивы.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБ ИСТОЧНИКАХ И ПУТЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМОВ И ВОДОТОКОВ

Спекулятивность информации о происхождении загрязнения характерна не только для Байкала, но и для всех водоемов и водотоков мира, поскольку на сегодня существует всего два подхода к определению происхождения загрязнения: метод обратных траекторий [11] и метод отпечатка источника на объекте среды, наиболее совершенный вариант которого — метод многокомпонентного смешения [12]. Первый основан на ретроспективном расчете движения воздушных масс по данным метеонаблюдений и на оценке содержания загрязнителя в воздухе. Траектории указывают на регион, в котором произошла эмиссия загрязнителя, но не на конкретное место и источник. Площадь территории, идентифицируемой как «родина» загрязнителя, составляет десятки тысяч квадратных километров, что сопоставимо с площадью отдельных регионов России или европейских государств. Такой подход годится разве что для оценки атмосферной циркуляции в региональном или глобальном масштабе [11], но для исследований в бассейне Байкала явно не подходит.

Для выявления источников загрязнения больше подходит метод отпечатка. Изначально он разрабатывался для оценки вкладов составляющих стока (поверхностный, почвенный и грунтовый стоки) в речной сток [12], но впоследствии диапазон его применения значительно расширился, и сейчас он используется в том числе для выявления происхождения загрязнителей в объектах среды. Метод основан на сопоставлении содержания загрязнителей в выбросах предполагаемых источников (профилей источников) или сточных водах с их содержанием в загрязняемом объекте. Объект рассматривается как смесь, а источники — как ее компоненты. В зависимости от вида загрязнителя и объекта загрязнения подходы к идентификации источника сильно различаются. Например, для оценки загрязненности грунтовых или речных вод сточными используются абсолютные концентрации загрязнителей, измеряемые в месте сброса [13]. Такие случаи встречаются редко. Гораздо чаще приходится иметь дело со случаями загрязнения через атмосферный канал, когда концентрации загрязнителя в источнике эмиссии и загрязняемом объекте априори имеют разные размерности, источник неизвестен, как и состав его выбросов, а само загрязнение не очевидно. Основным, если не единственным, направлением в этом ключе являются исследования происхождения ПАУ в объектах среды. Объясняется это тем, что ПАУ имеют преимущественно антропогенную природу (образуются в результате сгорания органического вещества) и устойчивы к разложению [9]. Случаи его применения к другим загрязнителям, например тяжелым металлам, единичны.

Чаще всего о происхождении ПАУ судят по так называемым диагностическим отношениям — отношениям концентраций их изомеров в исследуемом объекте и в предполагаемом источнике по литературным данным [14]. Наиболее комплексным диагностическим отношением является «пирогенный индекс», использующийся для установления пирогенного либо петрогенного происхождения ПАУ [15].

Другой способ идентификации источников загрязнения — использование методов многомерного статистического анализа, таких как метод главных компонент, кластерный и факторный анализ [16]. Суть методов сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных или к ее сингулярному разложению, что превращает большой набор индивидуальных загрязнителей в малое число переменных, называемых главными компонентами, или факторами. Считается, что каждая компонента (фактор), характеризующаяся определенным набором (профилем) загрязнителей, представляет собой источник загрязнения.

Похожий принцип лежит в основе метода автоматического разрешения кривой, реализованного в модели UNMIX [17]. Недостаток этого способа в том, что фактор, или компонента, — это просто линия, протянувшаяся в направлении максимальной изменчивости исходных данных. Эта линия может

быть комбинацией профилей сразу нескольких источников [18]. Другая проблема в том, что полученные профили источников не с чем сравнить, т. е. невозможно идентифицировать. Единственный реальный способ установить происхождение загрязнителя — сравнить их состав в исследуемом объекте с составом источника эмиссии.

К сожалению, данные о составе загрязнителей в выбросах источников в литературе редки, и единственным способом их получения является расчет по данным о содержании загрязнителей в объектах среды, что и предполагается сделать в ходе выполнения работ по этому проекту. Упоминания о таких экспериментах в литературе отсутствуют. Идентификация источников загрязнения путем построения картосхем их влияния и сопоставления с картой размещения реальных промышленных и коммунально-бытовых объектов также никогда и никем не выполнялась.

Существующие подходы к отображению пространственного распределения загрязнителей обычно предполагают нанесение на карту местности величин их концентраций в изолинейной или цветовой форме. Наиболее технологичным подходом в настоящее время, по-видимому, является картографическое моделирование концентраций загрязнителя на местности, где его измерения не проводились, по данным о содержании загрязнителя в модельных точках [19].

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА

Смещение — естественный процесс интеграции вещества, дезинтегрирующегося в процессе гипергенеза, который приводит к формированию новых, более сложных многокомпонентных объектов [20]. Используемая нами методология геоэкологического мониторинга базируется на выявлении источников загрязнения и наблюдении связей между ними и объектами среды путем рассмотрения техногенного вещества объектов в качестве смесей, а вещества источников — в качестве их компонентов [21]. Показателем тесноты связи между источником и объектом загрязнения служит величина вклада источника в загрязнение объекта. Ее изменение в пространстве и времени означает изменение либо в работе источника, либо в маршруте загрязнителя.

Такой подход применим к мониторингу на любом уровне — от локального до глобального, поскольку смесью является любой предмет — от субмикронной почвенной или аэрозольной частицы до гидросферы, почвы или атмосферы. Он в равной степени подходит как для мониторинга качественного и количественного состава загрязнителей в воде Байкала и его донных осадках, так и для мониторинга загрязнения любого объекта среды в любой части его водосборного бассейна.

Выявление источников и оценка величин их вкладов в смесь осуществляются методом многокомпонентного смещения на основе трассеров — веществ с различной концентрацией в источниках [22]. Их выбор неразрывно связан с идентификацией самих источников, поскольку концентрации трассеров служат координатной системой, в которой расположены точки источников. Подбор трассеров и источников производится до тех пор, пока внутрь геометрической фигуры, образованной источниками и ограничивающей область смещения, не попадает максимальное число точек образцов [22]. Получаемые в результате величины вкладов источников в загрязнение объекта среды относительно (выражены в долях от единицы или процентах), что позволяет избежать недооценки или переоценки влияния источника, связанных со способностью загрязнителей накапливаться на различных геохимических барьерах либо рассеиваться в атмосфере или гидросфере. Эта особенность предлагаемого подхода определяет его преимущество перед известным в геохимии методом выделения ореолов рассеяния и является абсолютным новшеством в плане оценки пространственной вариабельности распространения загрязнителей.

Для разработки и опробования методики комплексного геоэкологического мониторинга, включающей определение степени загрязненности компонентов геосистем бассейна Байкала, источников и путей поступления загрязнителей в озеро и окружающие геосистемы, необходимо выявление пространственно-временной структуры загрязнения бассейна озера, основанное на анализе его ландшафтной организации и закономерностей распределения загрязнителей.

КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ОСНОВА МОНИТОРИНГА

Для обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга на геосистемы территорий, не охваченных непосредственными наблюдениями, и отражения оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем применяется комплекс методов ландшафтного картографирования, предложенных ранее для обоснования целей рационального природопользования

[23, 24]. Кроме того, привлекаются подходы, разработанные в рамках подсистемы ландшафтного мониторинга [25]. Ее концепция предполагала использование данных стационарных и экспериментальных исследований состояний геосистем и экстраполяцию результатов мониторинга на геосистемы территорий, не охваченных непосредственными наблюдениями.

Инструментами выявления структуры хозяйственной деятельности служат методы ландшафтно-геохимического синтеза, картографирования агроландшафтов, ландшафтного планирования и ретроспективного картографического анализа геосистем с длительной историей хозяйственного освоения. Выявление структуры загрязнения Байкала, его притоков и водосборного бассейна в целом осуществляется путем анализа пространственного и временного распределения загрязнителей (ПАУ, нефтепродуктов, тяжелых металлов и т. д.) в объектах окружающей среды (снеге, речных и озерных водах, донных осадках и т. д.). Для картографирования дифференциации загрязнителей используются современные методы геоинформационного анализа и моделирования, реализованные в программе ArcGIS 10. Расчет составов выбросов неизвестных источников проводится с применением методов многомерного анализа [16, 17].

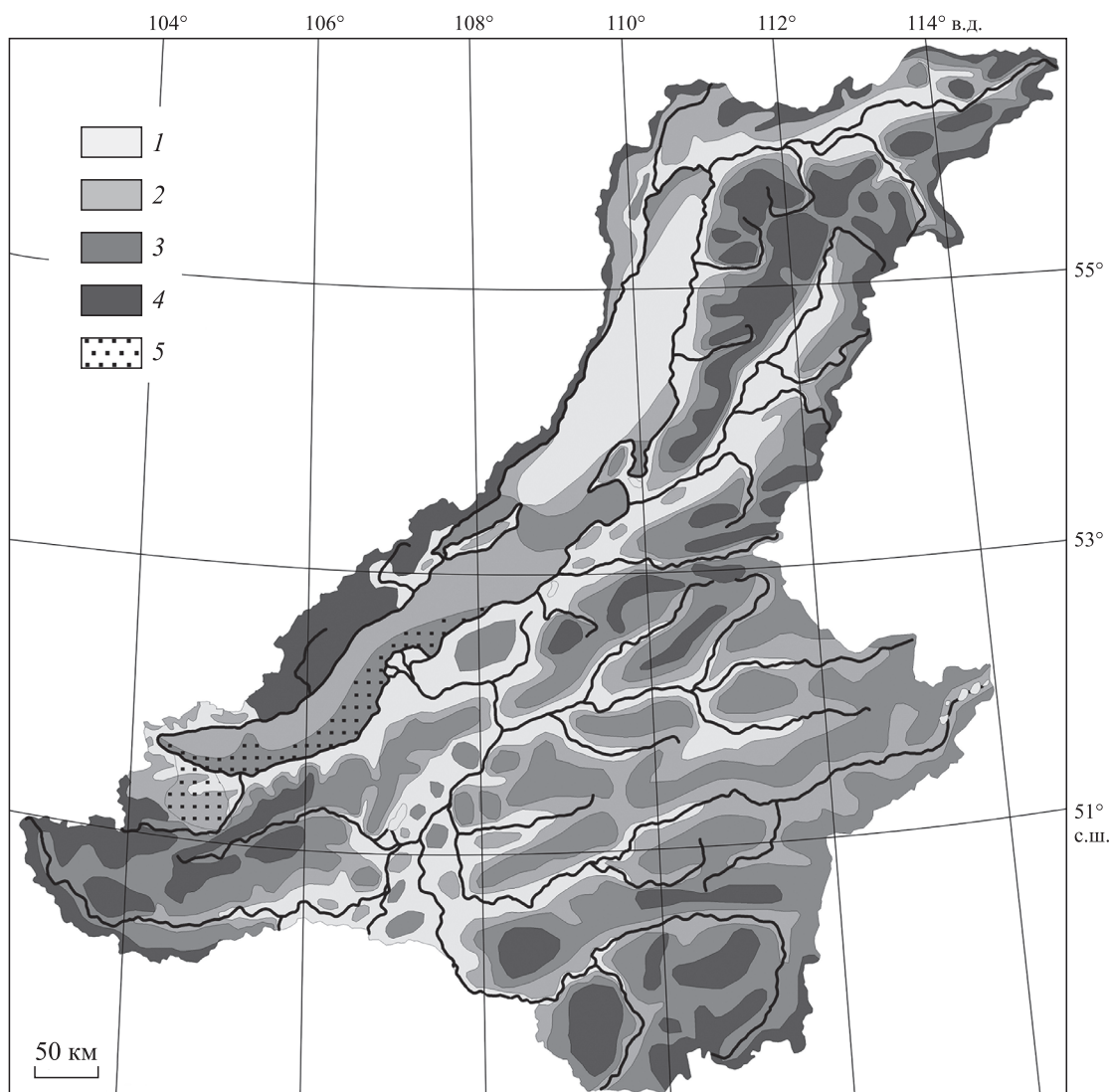
Реконструкция состава выбросов источников базируется на принципе смешения. Для расчета вкладов источников смешение их выбросов отображается в виде геометрической модели, а величины вкладов вычисляются путем решения систем линейных уравнений, в которых переменными являются доли источников, коэффициентами — относительные концентрации загрязнителей, а сумма переменных равна единице. Идентификация источников производится путем наложения карт распространения загрязнения и величин вкладов источников в загрязнение на карты структуры хозяйственной деятельности (расположения промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных объектов) при помощи ГИС-программ. Сгущение изолиний вкладов (или интенсивности цвета) того или иного гипотетического источника вблизи реально существующего объекта хозяйственной деятельности означает, что источник идентифицирован.

Появление в последние годы космических снимков среднего и высокого разрешения, цифровых моделей рельефа разного пространственного разрешения, сопоставимых по точности с аналогичными данными, взятыми с топографических карт, и развитие методов сложного пространственного анализа позволили дополнить, расширить методику геоинформационного картографирования и адаптировать ее применительно к бассейну оз. Байкал. Для получения изолиний рельефа за основу взята модель Shuttle radar topographic mission (SRTM) 4-й версии, данные которой представляют собой матрицу высот с размером ячейки в 3 угловые секунды (около 90 м). Эта матрица была преобразована и приведена к м-бу 1:5 000 000, а все цифровые слои интегрированы в единую картографическую проекцию и систему координат (WGS 84). Для создания, привязки сети и экстраполяции результатов мониторинга подготовлена картографическая основа. Сопоставление пространственно привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS позволило разграничить бассейны крупных (Селенги, Баргузина, Верхней Ангары), средних и малых притоков Байкала.

По результатам анализа массива данных о содержании в водах Байкала и его притоков ПАУ, органического углерода и минерального азота разработаны единые показатели состава вод, связывающие их загрязнение с условиями водосборного бассейна: величины техногенной нагрузки на экосистему и показатели способности к нейтрализации загрязнения. Ранжирование этих показателей позволило выделить участки акватории озера, характеризующиеся различной способностью к самоочищению, а также участки водосборного бассейна, почвы которых обуславливают формирование вод разных типов.

Территориальные выделы — ареалы геосистем с различной скоростью разложения органического вещества (ОВ) — выявлялись путем интерпретации легенд и корректировки контуров геологической, почвенной, ландшафтной карт из «Экологического атласа бассейна озера Байкал» [26] и карт из «Национального атласа почв Российской Федерации [27] с учетом взглядов и данных авторов настоящего исследования. Интенсивность минерализации ОВ в почвах оценивалась с помощью опадно-подстилочного коэффициента, а в водах Байкала — с помощью величин $N_{\text{мин}}/C_{\text{орг}}$. Полученные контуры были генерализованы в соответствии с масштабом карты пространственной дифференциации биогеохимических параметров ландшафтной организации бассейна Байкала (см. рисунок). Отдельными контурами на схеме показаны области интенсивного загрязнения.

Наивысшей интенсивностью разложения ОВ характеризуются подгорные, межгорных понижений и долин таежные темнохвойные системы оптимального развития хр. Хамар-Дабан, в почвенном покрове которых доминируют буроземы грубогумусные. Почвы остальных геосистем восточного побережья (дерново-карбонатные, аллювиальные луговые и т. д.) имеют средние и низкие значения



Интенсивность минерализации органического вещества в почвах и поверхностных водах бассейна оз. Байкал.

Интенсивность минерализации: 1 — очень низкая, 2 — низкая, 3 — средняя, 4 — высокая. 5 — области интенсивного загрязнения.

опадно-подстилочного коэффициента. Наименьшие значения показателей разложения ОВ характерны для гольцовых и подгольцовых геосистем, а также для таежных лесов западного побережья (преимущественно с подзолами и дерново-подзолистыми почвами).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из важнейших задач прикладной географии и геоэкологии является разработка технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды. Несмотря на обилие разного рода методик геоэкологического мониторинга, до сих пор остается не решенным вопрос идентификации источников загрязнения и путей поступления загрязнителей в геосистемы.

Предлагаемый подход к изучению распределения загрязнителей в водосборном бассейне Байкала, базирующийся на принципе смешения, включает выявление антропогенных источников вещества и связей между ними и объектами среды путем рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников — в качестве их компонентов, с использованием подходов ландшафтного мониторинга. Опреде-

ление источников и оценка величин их вкладов в смесь осуществляются методом многокомпонентного смешения на основе трассеров — веществ, концентрациями которых источники отличаются друг от друга. Выбор трассеров неразрывно связан с идентификацией самих источников, поскольку концентрации трассеров являются координатной системой, в которой расположены точки источников. Показателем тесноты связи между источником и объектом загрязнения служит величина вклада источника в загрязнение объекта, а ее изменение в пространстве и времени говорит об изменении в работе источника либо об изменении маршрута загрязнителя.

Для выявления пространственно-временной структуры загрязнения и закономерностей распределения загрязнителей в бассейне Байкала проведен анализ его ландшафтно-геохимической дифференциации. Выявлены ареалы геосистем с различной скоростью разложения органического вещества. Интенсивность его минерализации в почвах оценивалась с помощью опадно-подстилочного коэффициента, а в водах Байкала — отношения содержания минерального азота и органического углерода.

На базе проведенного анализа подготовлена картографическая основа, которая с применением подходов ландшафтного мониторинга, ретроспективного ландшафтно-картографического анализа антропогенно нарушенных территорий и ландшафтно-геохимического синтеза будет способствовать успешной реализации геоэкологического мониторинга и позволит обосновать планирование мероприятий по минимизации экологических рисков.

Работа выполнена в рамках базовых проектов (0345–2019–0008, 0347–2019–0003) при поддержке Правительства Иркутской области и финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17–45–388054, 17–29–05068).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Охрана** озера Байкал и обеспечение рационального природопользования в Байкальском регионе: Ежегодный доклад Правительственной комиссии по Байкалу за 1997 год. — М.: Государственный центр экологических программ, 1998. — 128 с.
2. **Грачёв М.А.** О современном состоянии экологической системы озера Байкал. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 154 с.
3. **Kirso U., Irha N., Paalme L., Reznikov S., Matveev A.** Levels and origin of PAHs in some big lakes // Polycyclic Aromatic Compounds. — 2001. — Vol. 22 (3–4). — P. 715–728.
4. **Ok G., Sharipova G., Matafonova G., Batoev V., Lee S.** Characteristics of PAHs, PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the sediment of Lake Baikal, Russia // Polycyclic Aromatic Compounds. — 2013. — Vol. 33. — P. 173–192.
5. **Semenov M., Marinaite I., Golobokova L., Khuriganova O., Tomberg I., Khodzher T., Semenov Yu.** Comparison of sources and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in Lake Baikal water and adjacent air layer // Chemistry and Ecology. — 2017. — Vol. 33, N 10. — P. 977–990.
6. **Батоев В.Б., Вайсфлог Л., Венцель К.-Д., Цыденова О.В., Палицына С.С.** Загрязнение бассейна озера Байкал: полиароматические углеводороды // Химия в интересах устойчивого развития. — 2003. — Т. 11. — С. 837–842.
7. **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. 87–97.
8. **Ravindra K., Sokhi R., Grieken R. van.** Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation // Atmospheric Environment. — 2008. — Vol. 42. — P. 2895–2921.
9. **Семёнов М.Ю., Снытко В.А., Маринайте И.И.** Исследование происхождения полициклических ароматических углеводородов в воде озера Байкал // ДАН. — 2017. — Т. 474, № 6. — С. 746–750.
10. **Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В.** Перенос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. — 2013. — Т. 26, № 2. — С. 93–99.
11. **Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Vogt R.D., Andersen S.** Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater endmembers — a step toward second-generation of acidification models // Journ. of Hydrology. — 1990. — Vol. 116. — P. 307–320.
12. **McArthur J.M., Sikdar P.K., Hoque M.A., Ghosal U.** Waste-water impacts on groundwater: Cl/Br ratios and implications for arsenic pollution of groundwater in the Bengal Basin and Red River Basin, Vietnam // Science of the Total Environment. — 2012. — Vol. 437. — P. 390–402.
13. **Renner R.M., Glasby G.P., Szefer P.** Endmember analysis of heavy-metal pollution in surficial sediments from the Gulf of Gdansk and the southern Baltic Sea off Poland // Applied Geochemistry. — 1998. — Vol. 13 (3). — P. 313–318.
14. **Tobiszewski M., Namiesnik J.** PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // Environmental Pollution. — 2012. — Vol. 162. — P. 110–119.

15. Wang J., Rossow W.B., Uttal T., Rozendaal M. Variability of cloud vertical structure during ASTEX observed from a combination of rawinsonde, radar, ceilometer, and satellite // *Monthly Weather Review*. — 1999. — Vol. 127. — P. 2484–2502.
16. Larsen R.K., Baker J.E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods // *Environmental Science and Technology*. — 2003. — Vol. 37. — P. 1873–1881.
17. Henry R.C. Multivariate receptor models — current practice and future trends // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. — 2002. — Vol. 60 (1–2). — P. 43–48.
18. Семёнов М.Ю., Снытко В.А., Маринайте И.И. Новый метод оценки вкладов источников полициклических ароматических углеводородов в загрязнение объектов природной среды // *ДАН*. — 2015. — Т. 463, № 1. — С. 94–98.
19. Legorburu I., Rodríguez J.G., Valencia V., Solaun O., Borja Á., Millán E., Galparsoro I., Larreta J. Sources and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal sediments of the Basque Country (Bay of Biscay) // *Chemistry and Ecology*. — 2014. — Vol. 30, N 8. — P. 701–718.
20. Вассоевич Н.Б. Слоистость и осадочная дифференциация // *ДАН СССР*. — 1949. — Т. 66, № 4. — С. 685–688.
21. Семёнов М.Ю., Маринайте И.И., Жученко Н.А., Хуриганова О.И., Башенхаева Н.В., Моложникова Е.В. Выявление источников и путей поступления полициклических ароматических углеводородов в поверхностные воды на основе данных химического мониторинга // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. — 2017. — № 1. — С. 40–49.
22. Семёнов М.Ю., Снытко В.А. Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // *ДАН*. — 2013. — № 453 (6). — С. 686–689.
23. Снытко В.А., Семёнов Ю.М. Опыт сопряженного картографирования геомеров и геохор // *География и природ. ресурсы*. — 1981. — № 4. — С. 28–37.
24. Семёнов Ю.М. Ландшафтное картографирование в целях рационального природопользования // *География и природ. ресурсы*. — 1985. — № 2. — С. 22–28.
25. Семёнов Ю.М., Суворов Е.Г. К разработке концепции ландшафтного мониторинга // *География и природ. ресурсы*. — 1994. — № 4. — С. 5–9.
26. *Экологический атлас бассейна озера Байкал* / Ред. А.Р. Батуев, Л. М. Коротный, Ж. Оюунгэрэл, Д. Энхтайван. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — 145 с.
27. *Национальный атлас почв Российской Федерации* / Под общ. ред. С.А. Шобы. — М.: Астрель, 2011. — 632 с.

Поступила в редакцию 30.06.2018

После доработки 29.10.2018

Принята к публикации 27.12.2018