

**КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА БАСЕЙНА ОЗЕРА БАЙКАЛ****В.А. Снытко<sup>1,2</sup>, Ю.М. Семенов<sup>2</sup>, М.Ю. Семенов<sup>3</sup>, А.В. Силаев<sup>2</sup>, Г.И. Лысанова<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,*<sup>2</sup> *Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,*<sup>3</sup> *Лимнологический институт СО РАН***Аннотация.**

Разрабатываемая методология геоэкологического мониторинга основана на выявлении антропогенных источников вещества и наблюдении связей между ними и объектами среды путем рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников в качестве их компонентов, с использованием подходов ландшафтного мониторинга. Обоснованы методические подходы к разработке картографического обеспечения мониторинга структуры загрязнения и распределения загрязнителей в бассейне озера Байкал. Для обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга на территории, не охваченные непосредственными наблюдениями, показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем требуется картографическая основа. Методика картографирования базируется на основных положениях учения о геосистемах В.Б. Сочавы. Методические приемы геоинформационного картографирования были адаптированы применительно к бассейну оз. Байкал. Модель SRTM 4-й версии, взятая за основу для получения изолиний рельефа, была преобразована и приведена к масштабу 1:5 000 000, а все цифровые слои были интегрированы в единую картографическую проекцию и систему координат (WGS 84). Сопоставление пространственно привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS позволило разграничить бассейны крупных, средних и малых притоков Байкала. 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 в компонентах природной среды. Картографирование дифференциации загрязнителей проводится с использованием современных методов геоинформационного анализа и моделирования, которые реализованы в программе ArcGIS 10. Расчет составов выбросов неизвестных источников проводится с применением методов многомерного анализа. Проанализированы основные параметры ландшафтно-геохимической дифференциации бассейна озера Байкал, составлена карта дифференциации поверхностных вод по способности обеспечивать тот или иной состав вод.

**Ключевые слова:** Байкал, геоэкологический мониторинг, картографическое обеспечение, ландшафтно-гидрохимические системы.

**CARTOGRAPHIC ENSURING OF GEOENVIRONMENTAL MONITORING  
IN THE BASIN OF LAKE BAIKAL****V.A. Snytko<sup>1</sup>, Yu.M. Semenov<sup>2</sup>, M.Yu. Semenov<sup>3</sup>, A.V. Silayev<sup>2</sup>, G.I. Lysanova<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of RAS, Moscow,*<sup>2</sup> *V.B. Sochava Institute of Geography of SB RAS, Irkutsk,*<sup>3</sup> *Limnological Institute of SB RAS, Irkutsk,***Abstract.**

The developed methodology of geoenvironmental monitoring is based on identification of anthropogenic sources of substance and the observation of communications between them and the

objects of the environment by consideration of the objects as mixes, and the sources as their components, with use of approaches of landscape monitoring. Methodical approaches to development of cartographic ensuring of monitoring of pollution and distribution of pollutants in the basin of Lake Baikal are proved. The cartographic basis is necessary for justification of the network of observations and monitoring, extrapolation of results of monitoring on the territories which are not captured by immediate observations, display of operational information on a condition of geosystems and ecosystems. The technique of mapping is based on original positions of V.B. Sochava doctrine about geosystems. Methodical techniques of geoinformation mapping were adapted in relation to the basin of Lake Baikal. The SRTM model of the 4th version taken as a basis for receiving isolines of a relief was transformed and scaled by 1:5,000,000. All digital layers were integrated into a uniform cartographic projection and a frame (WGS 84). Comparison of spatially- attached layers of a relief and a hydrographic network in QGIS allowed us to differentiate the pools of the large, average and small inflows of Baikal. The methods of landscape-geochemical synthesis, mapping of agro-landscapes, landscape planning and the retrospective cartographic analysis of geosystems with the long history of economic development served as the instruments of identification of the structure of economic activity. Identification of pollution structure of Lake Baikal, its inflows and a catchment basin in general is carried out by the analysis of spatial and temporary distribution of pollutants in environment components. Mapping of pollutants differentiation is carried out with use of the modern methods of the geoinformational analysis and the model operation, which are realized in the ArcGIS 10 program. Calculation of compositions for the emissions of unknown sources is carried out with application of methods of the multidimensional analysis. Key parameters of landscape-geochemical differentiation of the basin of Lake Baikal are analyzed. The map of differentiation of the surface water on ability of waters to self-cleaning has been compiled. The scheme of regionalization for the territory on ability to provide this or that composition of waters has been developed.

**Keywords:** Baikal, geoenvironmental monitoring, cartographic providing, landscape-hydrochemical systems.

### **Введение.**

Оз. Байкал является не только уникальным природным объектом, но и крупнейшим резервуаром питьевой воды в регионе, поэтому выявление источников и путей поступления загрязнителей в озеро является актуальной задачей.

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 проведение исследований, направленных на выявление пространственно-временной структуры загрязнения бассейна озера на основе анализа его ландшафтной организации и закономерностей распределения загрязнителей.

Предложен проект разработки методологии геоэкологического мониторинга, основанной на выявлении антропогенных источников вещества и наблюдении связей между ними и объектами среды путем рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников в качестве их компонентов, с использованием подходов ландшафтного мониторинга. Для обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга на территории, не охваченные непосредственными наблюдениями, показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем разрабатывается картографическая основа.

### **Материалы и методы.**

Методика создания картографической основы мониторинга, базирующаяся на основных положениях учения о геосистемах [12], включает комплекс методов, предложенных ранее для обоснования целей рационального природопользования [8], и подходы ландшафтного мониторинга [10].

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 SRTM 4-й версии, данные которой представляют собой матрицу высот с размером ячейки 3 угловые секунды. Эта матрица была преобразована и приведена к масштабу 1:5 000 000, а все цифровые слои интегрированы в единую картографическую проекцию и систему координат (WGS 84). Сопоставление пространственно привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS позволило разграничить бассейны крупных, средних и малых притоков Байкала.

Инструментами выявления структуры хозяйственной деятельности служат методы ландшафтно-геохимического синтеза, картографирования агроландшафтов, ландшафтного планирования и ретроспективного картографического анализа геосистем с длительной историей хозяйственного освоения [1, 3, 9, 11]. Выявление структуры загрязнения Байкала, его притоков и водосборного бассейна в целом осуществляется путем анализа пространственного и временного распределения загрязнителей (полициклических ароматических углеводородов, нефтепродуктов, тяжелых металлов и т. д.) в объектах окружающей среды (снеге, речных и озерных водах, донных осадках и т. д.) [5]. 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 [14, 15].

Реконструкция состава выбросов источников базируется на принципе смешения [2]. 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 [6, 7].

#### **Результаты и их обсуждение**

Для выявления пространственно-временной структуры загрязнения и закономерностей распределения загрязнителей в бассейне озера Байкал проанализированы основные параметры его ландшафтно-геохимической дифференциации. Анализ массива данных о содержании в водах Байкала и его притоков ПАУ, органического углерода и минерального азота позволил разработать 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 [16].

Территориальные выделы – ареалы геосистем – различной скоростью разложения органического вещества – выявлялись путем интерпретации легенд и корректировки контуров геологической, почвенной, ландшафтной карт из «Экологического атласа бассейна озера Байкал» [13] и карт из «Национального атласа почв Российской Федерации» [4] с учетом взглядов и данных авторов настоящего исследования. Интенсивность минерализации органического вещества (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. Отдельными контурами на схеме показаны области интенсивного загрязнения.

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

Для выявления пространственных закономерностей формирования химического состава вод притоков южного Байкала и оценки их влияния на состав воды озера в качестве исходных данных была выбрана наименее изученная и наиболее вариабельная фракция вещества вод и дренируемых ими почв и пород – металлы.

Материалами исследования послужили данные эпизодических измерений состава вод и донных осадков малых рек южного побережья озера Байкала, производившихся на протяжении последних тридцати лет. Объектами исследований послужили 75 водотоков: от реки Малая Кочерикова, впадающей в Байкал на юго-западном побережье в 18 км к северо-востоку от села Онгурен, до реки Мишиха, впадающей в Байкал на юго-восточном побережье, в Кабанском районе Республики Бурятия.

Изучен состав металлов вод и донных отложений южных притоков озера Байкал, рассчитаны коэффициенты их водной миграции. Составлена схема районирования территории по способности обеспечивать тот или иной состав вод. Обнаружена значительная дифференциация вод Байкала и его главных притоков по минерализации, преобладающим макроэлементам и микроэлементам. Сравнение химических свойств вод разных территорий проводилось после усреднения их составов для районов водосборного бассейна Байкала, выделенных путем анализа и интерпретации картографических материалов на основе ландшафтно-геохимических критериев. Разграничение бассейнов рек проводилось с помощью сопоставления пространственно-привязанных слоев рельефа и гидрографической сети в QGIS.

Названия районам давались в соответствии с их наиболее узнаваемыми топонимами: 1 – Байкальский горно-склоновый и подгорно-равнинный таежный; 2 – Слюдянский горно-склоновый и горно-долинный таежно-подтаежный; 3 – Листвянский горно-склоновый и предгорно-равнинный таежно-подтаежный; 4 – Голоустненский горно-склоновый и предгорно-равнинный таежно-подтаежный; 5 – Бугульдейский предгорно-подгорный таежно-подтаежный; 6 – Крестовский горно-склоновый подтаежный с участками остепненных лугов и горных степей; 7 – Еланцинский холмисто-низкогорный подтаежно-остепненный; 8 – Онгуренский горно-склоновый подтаежно-остепненный.

Исследованные воды значительно различаются по минерализации, что дает основание для их разделения на 3 категории: с минерализацией, значительно превышающей среднюю ( $>140$  мг/л), близкой к средней (80-140 мг/л) и значительно меньше средней (50-80 мг/л).

Различия в интенсивности миграции макроэлементов между водами разных местоположений незначительны, благодаря своей высокой биогенности среди макроэлементов во всех водах абсолютно преобладает Са, но в остальном их макроэлементный состав весьма неодинаков и позволяет выделить магниевые, натриево-магниевые и магниевно-натриевые воды.

Показатели миграции микроэлементов в водах различных районов значительно более контрастны, что наиболее отчетливо наблюдается при сравнении результатов нормирования содержаний микроэлементов по содержанию элементов, наиболее контрастных по степени подвижности (Al и Sr).

В значительной степени состав поверхностных вод обусловлен источниками их вещества.

Исходя из этих данных, были выделены следующие ландшафтно-гидрохимические системы Южного Прибайкалья:

а) ландшафтно-гидрохимические системы (по минерализации поверхностных вод) – с минерализацией: 1 - выше средней, 2 - около средней, 3 - ниже средней;

б) ландшафтно-гидрохимические системы (по макроэлементному составу вод): 1 - магниевые ( $Mg > 75\%$  от суммы  $Mg+K+Na$ ), 2 - натриево-магниевые ( $Mg$  65-55 %,  $Na$  40-30 %), 3 - магниево-натриевые ( $Na$  50-40 %,  $Mg$  50-30 %);

в) ландшафтно-гидрохимические системы (по микроэлементному составу вод): 1 -  $(Mo+V) > 8$  мкг/л, 2 -  $(Fe+Al) > 1,5$  мкг/л,  $(Mo+V) < 2$  мкг/л, 3 -  $(Fe+Al+Mo+V) < 2$  мкг/л;

г) ландшафтно-литохимические системы: 1 - алюмосиликатные кислые, 2 - алюмосиликатные кислые и щелочные, 3 - алюмосиликатные щелочные и карбонатные.

Для выявления структуры загрязнения водосборного бассейна в настоящее время подготовлены новые слои ГИС, характеризующие некоторые параметры современного природопользования (состав земель, лесохозяйственных, сельскохозяйственных и промышленных предприятий).

#### **Заключение.**

Для обоснования сети наблюдений и контроля, документирования и экстраполяции результатов геоэкологического мониторинга, показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем разработана методика создания картографической основы, базирующаяся на основных положениях учения о геосистемах.

Для выявления пространственно-временной структуры загрязнения и закономерностей распределения загрязнителей в бассейне оз. Байкал проанализированы основные параметры его ландшафтно-геохимической дифференциации. Это позволило выявить участки акватории озера, характеризующиеся различной способностью к самоочищению, а также участки водосбора, почвы которых обуславливают формирование вод разных типов.

На основе анализа и интерпретации данных по составу металлов вод и донных отложений южных притоков озера установлена их дифференциация по минерализации, преобладающим макроэлементам и микроэлементам, составлена схема районирования территории Южного Прибайкалья по способности обеспечивать тот или иной состав вод, выделены ландшафтно-гидрохимические системы.

Создаваемая картографическая основа совместно с подходами 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.

**Благодарность.** Исследование осуществлено в рамках базовых проектов №№ 0345-2019-0008 (AAAA-A16-116122110065-4), 0347-2019-0003 (AAAA-A17-117041910172-4) при поддержке Правительства Иркутской области и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 17-45-388054 – анализ и обработка данных – и 17-29-05068 – химический анализ и картирование).

#### **Литература**

1. Антипов А.Н., Семенов Ю.М. Ландшафтное планирование как инструмент управления природопользованием (на примере Байкальского региона) // Известия РАН. Серия географическая. – 2006. – № 5. – С. 82-91.
2. Вассоевич Н.Б. Слоистость и осадочная дифференциация // Доклады АН СССР. – 1949. – Т. 66, № 4. – С. 685-688.
3. Лысанова Г.И. Ландшафтный анализ агроприродного потенциала геосистем. – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2001. – 188 с.
4. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель, 2011. – 632 с.
5. Семенов 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.

6. Семенов М.Ю., Снытко В.А. Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // Доклады Академии наук. – 2013. – № 453(6). – С. 686-689.

7. Семенов М.Ю., Снытко В.А., Маринайте И.И. Новый метод оценки вкладов источников полициклических ароматических углеводородов в загрязнение объектов природной среды // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 463, № 1. – С. 94-98.

8. Семенов Ю.М. Ландшафтное картографирование в целях рационального природопользования // География и природные ресурсы. – 1985. – № 2. – С. 22-28.

9. Семенов Ю.М. Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. – Новосибирск: Наука, 1991. – 145 с.

10. Семенов Ю.М., Суворов Е.Г. К разработке концепции ландшафтного мониторинга // География и природные ресурсы. – 1994. – № 4. – С. 5-9.

11. Силаев А.В. Картографический анализ селитебных и распаханых территорий Тункинской котловины за последнее столетие // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 80-84.

12. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Наука, 1978. – 319 с.

13. Экологический атлас бассейна озера Байкал. – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2015. – 145 с.

14. Henry R. C. Multivariate receptor models – current practice and future trends // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2002. – V. 60(1-2). – Pp. 43-48

15. 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. – V. 37. – Pp. 1873-1881.

16. Semenov M., Marinaite I., Zhuchenko N., Silaev A., Vershinin K., Semenov Yu. Revealing the factors affecting occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of Lake Baikal and its tributaries // Chemistry and Ecology. – 2018. – Vol. 34, No. 10. – Pp. 925-940.

#### Reference

1. Antipov A.N., Semenov Ju.M. Landshaftnoe planirovanie kak instrument upravlenija prirodoopol'zovaniem (na primere Bajkal'skogo regiona) // Izvestija RAN. Serija geograficheskaja. – 2006. – № 5. – S. 82-91.

2. Vassoevich N.B. Sloistost' i osadochnaja differenciacija // Doklady AN SSSR. – 1949. – T. 66, № 4. – S. 685-688.

3. Lysanova G.I. Landshaftnyj analiz agroprirrodnogo potenciala geosistem. – Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2001. – 188 s.

4. Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii. – M.: Astrel', 2011. – 632 s.

5. Semenov M.Ju., Marinaite I.I., Zhuchenko N.A., Huringanova O.I., Bashenhaeva N.V., Molozhnikova E.V. Vyjavlenie istochnikov i putej postuplenija policiklicheskih aromaticskeh uglevodorodov v poverhnostnye vody na osnove dannyh himicheskogo monitoringa // Geojekologija, inzhenernaja geologija, gidrogeologija, geokriologija. – 2017. – №1. – S. 40-49.

6. Semenov M.Ju., Snytko V.A. Optimizacija podhodov k modelirovaniju himicheskogo sostava rechnyh vod // Doklady Akademii nauk. – 2013. – № 453(6). – S. 686-689.

7. Semenov M.Ju., Snytko V.A., Marinaite I.I. Novyj metod ocenki vkladov istochnikov policiklicheskih aromaticskeh uglevodorodov v zagraznenie ob#ektov prirodnoj sredy // Doklady Akademii nauk. – 2015. – T. 463, № 1. – S. 94-98.

8. Semenov Ju.M. Landshaftnoe kartografirovanie v celjah racional'nogo prirodoopol'zovanija // Geografija i prirodnye resursy. – 1985. – № 2. – S. 22-28.

9. Semenov Ju.M. Landshaftno-geohimicheskij sintez i organizacija geosistem. – Novosibirsk: Nauka, 1991. – 145 s.

10. Semenov Ju.M., Suvorov E.G. K razrabotke koncepcii landshaftnogo monitoringa // *Geografija i prirodnye resursy*. – 1994. – № 4. – S. 5-9.
11. Silaev A.V. Kartograficheskij analiz selitebnyh i raspahannyh territorij Tunkinskoj kotloviny za poslednee stoletie // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. – 2013. – № 2. – S. 80-84.
12. Sochava V.B. Vvedenie v učenje o geosistemah. – Novosibirsk: Nauka, 1978. – 319 s.
13. Jekologičeskij atlas bassejna ozera Bajkal. – Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2015. – 145s.
14. Henry R. C. Multivariate receptor models – current practice and future trends // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2002. – V. 60(1-2). – Pp. 43-48
15. 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. – V. 37. – Pp. 1873-1881.
16. Semenov M., Marinaite I., Zhuchenko N., Silaev A., Vershinin K., Semenov Yu. Revealing the factors affecting occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of Lake Baikal and its tributaries // *Chemistry and Ecology*. – 2018. – Vol. 34, No. 10. – Pp. 925-940.