

УДК: 911.9:504.054:547.62

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-46-59

А.В. Силаев¹, Ю.М. Семёнов², М.Ю. Семёнов³

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ГЕОИНФОРМАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БАСЕЙНА ОЗ. БАЙКАЛ

АННОТАЦИЯ

Оз. Байкал является уникальным природным объектом и крупнейшим резервуаром питьевой воды в регионе. Поэтому контроль за экологическим состоянием его бассейна остаётся актуальной задачей. Для выработки мер по снижению содержания загрязнителей в поверхностных и грунтовых водах бассейна озера и предотвращению негативного воздействия загрязнителей на здоровье жителей региона необходимо проведение исследований, направленных на выявление пространственно-временной структуры загрязнения бассейна озера. Разработаны основные подходы к методологии геоэкологического мониторинга состояния экосистем бассейна Байкала. Она базируется на выявлении антропогенных источников вещества и наблюдении связей между ними и объектами среды путём рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников в качестве их компонентов. При этом используются подходы ландшафтного мониторинга с учётом организации геосистем и закономерностей распределения загрязнителей. Обоснованы методические подходы к разработке картографического обеспечения мониторинга структуры загрязнения и распределения загрязнителей в бассейне оз. Байкал. В основе мониторинга лежит анализ множества данных о физико-географических условиях, структуре хозяйственной деятельности, уровне загрязнения, пространственном распределении и качественном составе загрязнителей. Поскольку при этом используются разнообразные материалы и данные, необходимым этапом является приведение их к геометрически сопоставимому виду — единому масштабу и проекции, т.е. взаимное трансформирование, что составляет важный элемент ГИС-технологии. Методика картографирования базируется на основных положениях учения о геосистемах. Проанализированы основные параметры ландшафтно-геохимической дифференциации бассейна, составлены карты дифференциации поверхностных вод по способности вод к самоочищению, а также схема районирования территории по способности обеспечивать тот или иной состав вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоинформационный анализ, картографирование, озеро Байкал, геосистемы, экологическое состояние

¹ Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: anton_s@bk.ru

² Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: yumsemenov@mail.ru

³ Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 3, 664033, Иркутск, Россия;
e-mail: smu@mail.ru

Anton V. Silaev¹, Yury M. Semenov², Mikhail Yu. Semenov³

BASIC APPROACHES TO GEOINFORMATION MODELING OF ECOLOGICAL STATE OF THE LAKE BAIKAL BASIN

ABSTRACT

Lake Baikal is a unique natural facility and the largest drinking water reservoir in the region. Therefore, monitoring the environmental status of its basin remains an urgent task. In order to develop measures to reduce the content of pollutants in the surface and groundwater of the lake basin and to prevent the negative impact of pollutants on the health of the inhabitants of the region, research is needed to identify the spatial and temporal structure of pollution in the lake basin. Basic approaches to biogeoeological monitoring methodology for Baikal basin ecosystems have been developed. It is based on the identification of anthropogenic sources of the substance and the observation of the links between them and the objects of the environment by considering the objects as mixtures and the sources as their components. Landscape monitoring approaches are used, taking into account the organization of geosystems and patterns of distribution of pollutants. Methodological approaches to the development of cartographic support for monitoring the pollution structure and distribution of pollutants in the Lake Baikal basin have been justified. Monitoring is based on the analysis of many data on physical and geographical conditions, economic structure, pollution level, spatial distribution and quality composition of pollutants. Since it uses a variety of materials and data, the necessary step is to bring them to a geometrically comparable view — a single scale and projection, that is, mutual transformation, which is an important element of GIS technology. The mapping methodology is based on the basic provisions of the geosystems exercise. The main parameters of landscape-geochemical differentiation of the basin are analyzed, maps of differentiation of surface waters by the ability of waters to self-clean and the scheme of zoning of the territory by the ability to provide certain water composition are drawn up.

KEYWORDS: geoinformation analysis, mapping, Lake Baikal, geosystems, ecological state

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Байкал — это не только уникальный природный объект, но и крупнейший резервуар питьевой воды в регионе, поэтому выявление источников и путей поступления загрязнителей в озеро является актуальной. Хотя к настоящему времени накоплена обширная база данных о загрязнении воды и донных осадков [Falkner *et al.*, 1991; 1997; Khodzher *et al.*, 2017 и др.], источники и пути их поступления в озеро до сих пор остаются невыясненными. Традиционно считается, что источник, расположенный непосредственно на берегу озера или его притока, является главным загрязнителем прилегающей акватории. Вместе с тем, результаты ряда исследований, включая наши [Semenov *et al.*, 2018; 2019 и др.], показали, что кажущаяся очевидной связь между источником и загрязнителем зачастую отсутствует. 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 проведение исследований, направленных на выявление пространственно-временной структуры загрязнения бассейна озера

¹ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 1, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: anton_s@bk.ru

² V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 1, 664033, Irkutsk, Russia;
e-mail: yumsemenov@mail.ru

³ Limnological Institute SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 3, 664033, Irkutsk, Russia; *e-mail:* smu@mail.ru

на основе анализа его ландшафтной организации и закономерностей распределения загрязнителей.

Этим целям и должен послужить геоэкологический мониторинг, методология которого основана на выявлении антропогенных источников вещества и наблюдении связей между ними и объектами среды путём рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников в качестве их компонентов, с использованием подходов ландшафтного мониторинга. Для обоснования сети наблюдений и контроля, а также экстраполяции результатов мониторинга на территории, не охваченные непосредственными наблюдениями, показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем разрабатывается картографическая основа. Её создание базируется на принципах учения о геосистемах [Сочава, 1978].

Поскольку объектом исследований является водосборный бассейн оз. Байкал, то при картографировании используется и бассейновый подход, так как бассейны — это каркасные образования с чёткими орографическими границами (водоразделами), обладающие строгой иерархичностью, которая сохраняется при любом масштабировании, и однонаправленностью потоков вещества, позволяющей замыкать их балансы на конкретных створах (рис. 1).

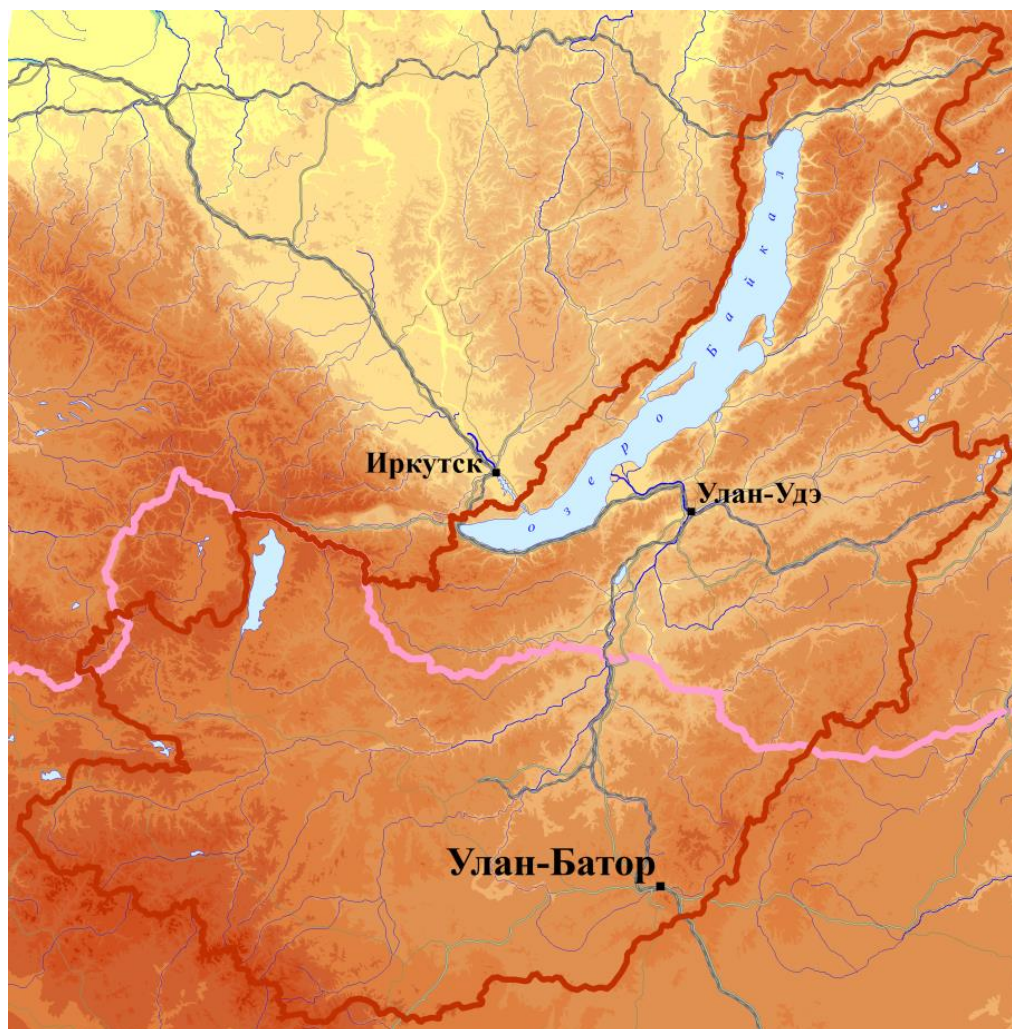


Рис. 1. Граница бассейна Байкала (показана красной линией)
Fig. 1. Baikal basin boundary (shown by red line)

Геоинформационную модель природно-антропогенной системы бассейна Байкала можно создать в результате совместного применения процедур пространственного анализа и современных технологий семантического анализа. База данных ГИС, ориентированной

на изучение акватории и геосистем окружения оз. Байкал, в первую очередь, бассейнов впадающих в него рек, в отличие от традиционных ГИС, должна содержать слои пространственно-координированных данных, сопряжённых во времени. Кроме того, подобная ГИС должна обеспечивать возможность анализа изменчивости (динамичности) объектов как на основе слежения за изменчивостью их границ, так и на основе сопоставления атрибутивных данных, привязанных к разновременным слоям пространственной информации [Берлянт, 1997].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выявление структуры загрязнения оз. Байкал, его притоков и водосборного бассейна в целом осуществляется путём анализа пространственного и временного распределения загрязнителей (полициклических ароматических углеводородов, нефтепродуктов, тяжёлых металлов и т.д.) в объектах окружающей среды (снеге, речных и озёрных водах, донных осадках) [Semenov *et al.*, 2018; 2019 (a, b)].

Для обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга и отображения оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем использовались методы ландшафтного картографирования. Методика создания картографической основы мониторинга, базирующаяся на основных структурно-динамических концепциях науки о ландшафтах [Сочава, 1978; Беручаишвили, 1986; Михеев, 1987 и др.], включает комплекс методов и подходов, предложенных для отображения не только пространственных закономерностей дифференциации и интеграции природных образований, но и для показа их временных изменений [Сочава и др., 1965; Михеев, 1974; 1987; Михеев, Ряшин, 1977; Беручаишвили, 1986; 1989; 1995; Семёнов, 1991].

Пространственные данные, необходимые для создания информационного обеспечения ГИС, можно подразделить на 2 группы: первичные, получаемые непосредственно в ходе выборочного обследования в полевых условиях или путём дистанционного зондирования, и вторичные, к числу которых относятся топографические и тематические карты, статистические материалы, данные метеорологических, гидрологических и экологических наблюдений, мониторинга, лабораторных исследований и т.п.

Основную территориально привязанную информацию для БД ГИС поставляют карты. Источником топографических данных служат топографические, обзорно-топографические и обзорные карты. При создании БД ГИС регионального уровня они чаще всего используют для построения координатной основы БД и выбора проекции, пространственной привязки тематических данных и в качестве источника данных о рельефе, гидрографии, населённых пунктах, дорогах, административных и др. границах объектов [Берлянт, 1997; Лурье, 2008].

Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) — важнейший источник информации о состоянии и изменении природной среды для создания тематических слоёв в БД, а также обновления (актуализации) топографических данных. ГИС-технологии способствуют эффективному совместному использованию картографических источников и снимков. Дешифрирование снимков позволяет создать множество типов тематических карт и слоёв БД ГИС, например, растительности, почвенного покрова, сельскохозяйственных культур, использования земель. Другими источниками тематических данных служат метео- и экологические наблюдения, мониторинг, лабораторные исследования и т.п.

Обширные и детальные данные могут быть получены в результате полевых исследований территорий, ключевых участков, которые являются основой оценочных и прогнозных исследований, а также расчёта интегральных показателей оценки экологического состояния природной среды. Широкие возможности для получения данных открывает также Интернет, где сформировалось особое геоинформационное гиперпространство — среда, в которой функционируют цифровая геоинформация и геоизображения всевозможных видов и назначения [Берлянт, 1997]. Здесь же распространяются электронные карты и атласы

(туристические, тематические карты и атласы, созданные для презентаций), отсканированные печатные карты и снимки, космические снимки, мультимедийные изображения, динамические карты, например, синоптические. Эти источники пространственных данных отвечают конкретным целям, среди которых — поиск справочной информации, профессиональные или образовательные интересы. Проблема использования таких данных в ГИС состоит в том, что зачастую их качество занижено или неизвестно. Снимки и карты могут добавляться в ГИС по мере надобности. При ограниченности технических ресурсов данные могут храниться как в цифровом, так и не цифровом виде (традиционные карты, снимки). Общее представление об информационной обеспеченности территории должна давать информационно-поисковая система, которую целесообразно включить в структуру ГИС.

Системный подход в географии, разработанный В.Б. Сочавой [1978], определил новый взгляд на картографирование географических систем. Исходной методологией этого подхода является определение географической системы как сложной иерархической с закономерными причинно-следственными связями. В настоящее время картографическое моделирование геосистем идет в направлении составления карт состава и содержания, динамики и функционирования геосистем. В целом, придерживаясь этого направления, учитывая современные тенденции, нами разработана методика геоинформационного мониторинга экологического состояния оз. Байкал и прилегающих территорий (рис. 2).



Рис. 2. Схема методики геоинформационного картографирования бассейна оз. Байкал
 Fig. 2. Diagram of geoinformation mapping technique of Lake Baikal basin

Методика геоинформационного картографирования подразделяется на несколько этапов:

- перевод картографических источников и материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в цифровую форму (векторизация) с точной географической привязкой и приведением к одной проекции;
- создание единой базы данных, объединяющих картографическую, статистическую информацию и материалы полевых наблюдений;
- морфометрический анализ рельефа, на основе ЦМР и последующий пространственный анализ на основе производных карт рельефа;
- создание ландшафтной основы для базовых карт мониторинга путём анализа и сопоставления тематических, разновременных слоёв в ГИС;
- составление карты современного землепользования;
- анализ изменения компонентов геосистем с целью выявления структуры загрязнения территории путем анализа пространственного и временного распределения загрязнителей;
- выявление динамических аспектов формирования природно-антропогенных геосистем, уточнение контуров ландшафтных выделов и содержания легенд подготовленных ранее ландшафтных карт;
- идентификация источников загрязнения путём сопоставления полученных данных о структуре загрязнения и зонах влияния источников с данными о структуре хозяйственной деятельности в регионе.

При геоинформационной оценке территории базовыми документами являются топографические карты, формализованные посредством оцифровки в векторный формат. После привязки и последующей трансформации растровых топографических карт (м-ба 1: 1 000 000, 1: 500 000) был осуществлён их перевод в векторный вид, созданы классы пространственных объектов: растительность (древесная, травянистая), гидрография (крупные реки и озёра), селитебные зоны (населённые пункты), сельхозугодья, линейные объекты (дороги, ЛЭП и т.п.). При выявлении границ контуров антропогенно-нарушенных территорий (распаханных и селитебных площадей, пожаров, вырубок, выбитых земель и т.п.) использовались космические снимки регионального охвата и глобальные информационные системы изменений лесного покрова Landsat Forest Cover Change [Sexton *et al.*, 2015], карты глобальных изменений лесного покрова в XXI в., High-Resolution Global Maps of 21st Century Forest Cover Change [Hansen *et al.*, 2013], глобальной карты типов растительного покрова ESA Glob Cover 2009¹.

Данные Landsat Forest Cover Change (LFCC 1990–2000, LFCC 2000–2005) представляют собой набор растровых изображений об изменениях в лесном покрове с пространственным разрешением 30 м. Базовая информация для LFCC 1990–2000, LFCC 2000–2005 получена на основе данных Global Land Survey (GLS) — набора лучших изображений со спутников серии Landsat практически на весь земной шар, созданных на период 1975, 1990, 2000, 2005 и 2010 гг. Данная информация позволила проследить динамические изменения геосистем, обусловленные вмешательством человека (лесные пожары, вырубки, распашка и др.), и восстановительную динамику в лесном покрове за последние 40–60 лет.

Карта глобальных изменений лесного покрова в XXI в. [Hansen *et al.*, 2013] также создана на основе съёмки спутников Landsat с пространственным разрешением 30 м и отражает фактическое изменение с 2000 г. покрытых лесом площадей, включая как потери

¹ ESA Glob Cover Version 2.3 2009 300m resolution Land Cover Map. Электронный ресурс: http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (дата обращения 24.11.2019)

лесного покрова в результате вырубок, пожаров, ветровалов и т.п., так и его увеличение в результате зарастания вырубок, гарей, брошенных сельхозугодий, лесовосстановления.

Глобальная карта типов растительного покрова ESA Glob Cover 2009 (версия 2.3) с пространственным разрешением 300 м создана на основе данных ENVISAT MERIS. Данные Landsat Forest Cover Change были конвертированы в векторный вид и содержат информацию за периоды 1990–2000 гг. и 2000–2005 гг. об участках, покрытых и не покрытых лесной растительностью в результате вырубок, пожаров и т.п., а также на участках с восстановленным лесным покровом.

На рис. 3 представлен фрагмент территории бассейна, на котором показана пространственная дифференциация типов земного покрова по растительности применительно к изученной нами территории, базирующаяся на перечне классов LCCS, использованных в Glob Cover (описание растительного покрова соответствует классам с идентификаторами ID = 30, 90, 100, 140, 150, 180, 190, 210, которые были детально изучены и охарактеризованы).

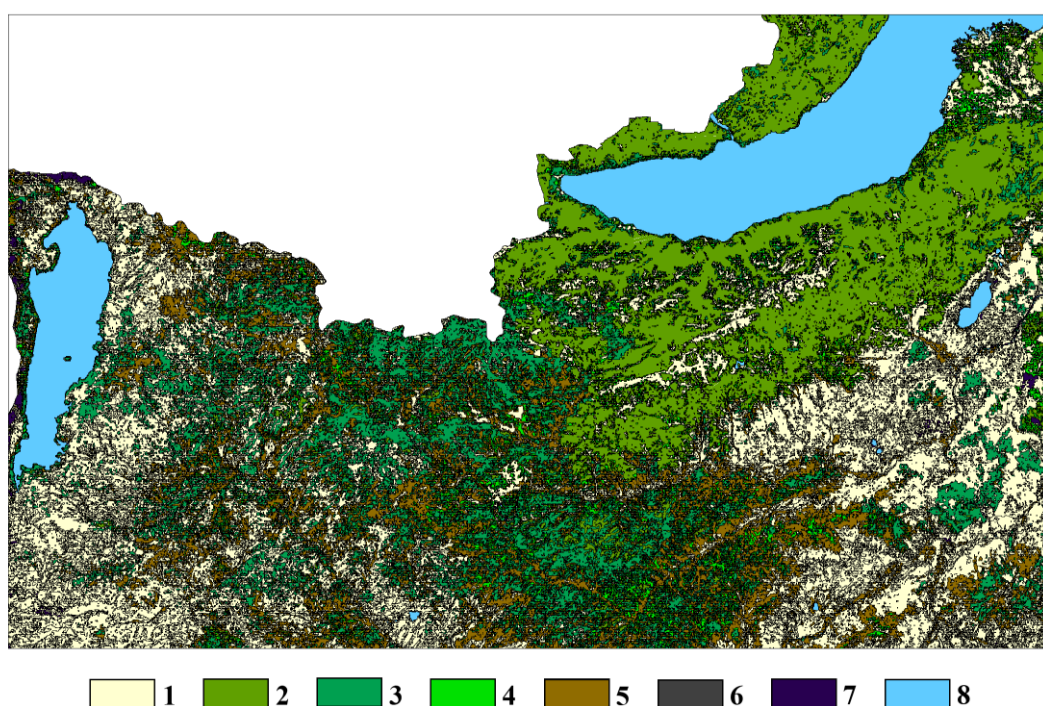


Рис. 3. Типы земного покрова (по растительности): 1 — безлесные (степенные участки с естественной растительностью, луга, пашни); 2 — леса светлохвойные с кустарниками; 3 — леса смешанные светло- и темнохвойные; 4 — леса сосновые и смешанные мелколиственно-светлохвойные; 5 — редколесья, кустарниковые заросли; 6 — леса паркового типа и кустарниковые пустоши остепнённые;

7 — гольцы и выходы горных пород, лишённые растительности; 8 — акватории
Fig. 3. Types of land cover (by vegetation): 1 — forest-free (steppe areas with natural vegetation, grasslands, arable lands; 2 — light coniferous forests with shrubs;
3 — mixed light coniferous and dark coniferous forests; 4 — pine forests, mixed small leaved and light coniferous forests; 5 — sparse growth forests, shrubs; 6 — forests of the park type and steppe shrubs; 7 — bald mountains and exits of rocks, deprived of vegetation;
8 — water areas

Для уточнения применялись скомпонованные поканально космические снимки Landsat (MSS, 5 TM и 7 ETM+, 8) [Pekel J.-F. et al., 2016]. При визуальном дешифрировании использовались различные комбинации каналов, прямые и косвенные признаки (чёткие очертания, линейные границы и т.п.), уточнённые данными классификации и полевых исследований.

Появление в последние годы 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 её 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" [Mallikarjun et al., 2019]. 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). Сопоставление пространственно привязанных слоёв рельефа и гидрографической сети в QGIS позволило разграничить бассейны крупных, средних и малых притоков Байкала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При составлении карты современного землепользования инструментами выявления структуры хозяйственной деятельности служили методы ландшафтно-геохимического синтеза, картографирования агроландшафтов, ландшафтного планирования и ретроспективного картографического анализа геосистем с длительной историей хозяйственного освоения. Для рисовки контуров использовались документы землеустройства, сельскохозяйственные, топографические разномасштабные карты и результаты дешифрирования материалов ДЗЗ. На подготовленной карте, которая наряду с ландшафтной основой будет служить одним из важнейших слоёв единой базы данных мониторинга, показаны типы использования земель, в т.ч. границы распаханых территорий. Наряду со слоями гидрографии и рельефа объединение и последующий анализ слоёв, отображающих исследуемые параметры загрязнения, послужат для последующего изучения и возможного нивелирования воздействия на природный каркас территории.

К настоящему времени выявлены региональные особенности формирования химического состава вод притоков оз. Байкал в зависимости от ландшафтных и геологических условий, определены показатели условий формирования химического состава и выполнена группировка вод по этим показателям. На основе анализа пространственного распределения загрязнителей выявлены основные пути их поступления в оз. Байкал и его притоки, рассчитаны вклады источников в загрязнение вод озера, и составлены картосхемы зон преобладающего влияния различных источников загрязнения. В результате исследований установлены основные источники загрязнения приземного слоя воздуха, воды и общие источники загрязнения воды и воздуха [Semenov et al., 2018].

Для комплексной оценки загрязнения водных объектов бассейна оз. Байкал на определены показатели уровней загрязнения, оценки вкладов притоков в загрязнение озера и способности вод к самоочищению. Выявление пространственно-временной структуры загрязнения включает анализ ландшафтной организации бассейна озера и закономерностей распределения загрязнителей. Проведён анализ ландшафтно-геохимической дифференциации бассейна оз. Байкал, выполнено 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. Для этого была разработана картографическая

основа, включающая ряд слоёв, отображающих основные факторы дифференциации показателей. Выявление территориальных выделов — ареалов геосистем с различной скоростью разложения органического вещества (рис. 4) — проводилось путём интерпретации легенд и корректировки контуров, опубликованных геологических, почвенных и ландшафтной карт с учётом собственных взглядов и собственных данных авторов настоящего исследования.

Изучение состава металлов вод южных притоков оз. Байкал и сравнение его с составом металлов в донных отложениях позволило рассчитать коэффициенты водной миграции и выполнить районирование территории южной части водосборного бассейна озера по способности обеспечивать тот или иной состав вод [Semenov *et al.*, 2019].

Сравнение химических свойств вод разных территорий проводилось после усреднения их составов для районов водосборного бассейна Байкала, выделенных путём анализа и интерпретации картографических материалов на основе ландшафтно-геохимических критериев (рис. 5).

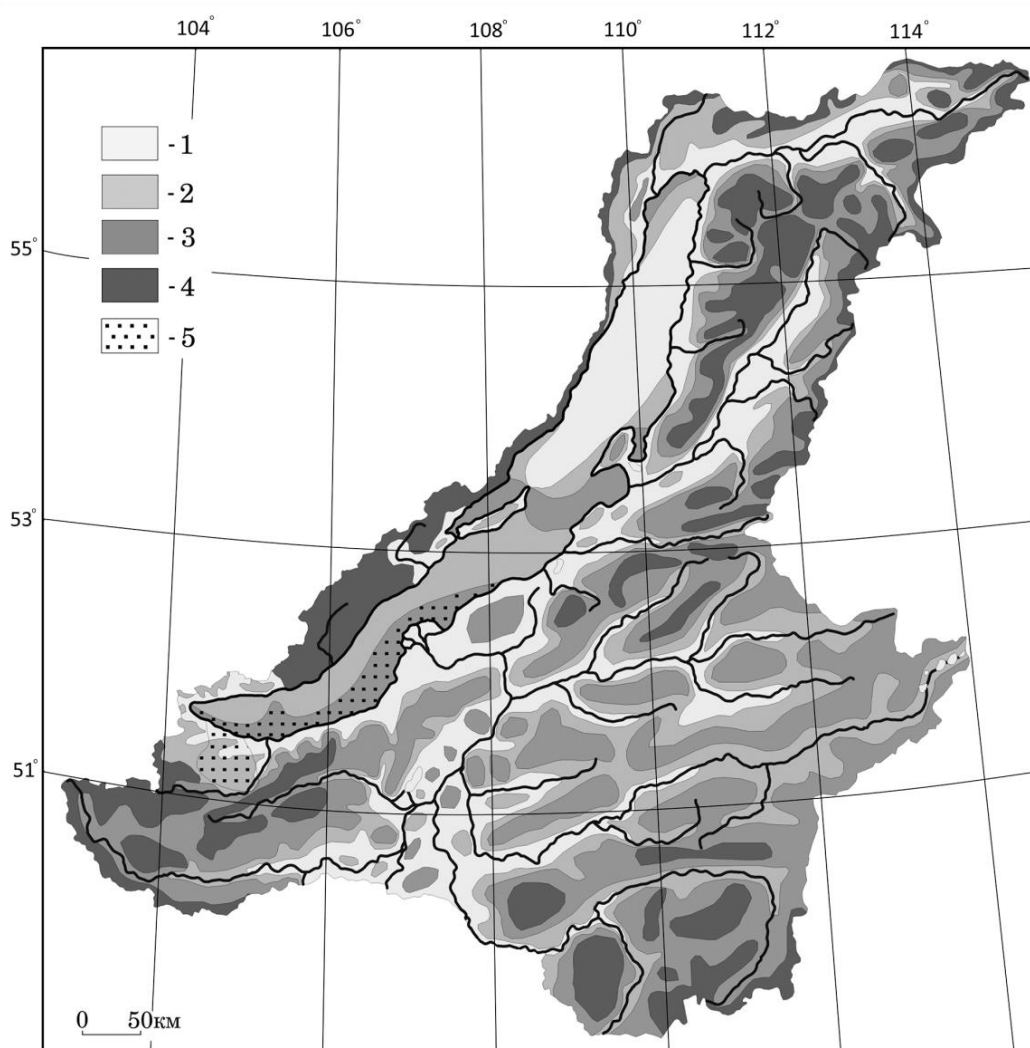


Рис. 4. Интенсивность минерализации *ОВ* в почвах и поверхностных водах бассейна оз. Байкал: 1 — очень низкая, 2 — низкая, 3 — средняя, 4 — высокая, 5 — области интенсивного загрязнения

Fig. 4. Intensity of organic matter mineralization in soils and surface waters of Lake Baikal basin: 1 — very low, 2 — low, 3 — medium, 4 — high, 5 — areas of intense contamination



Рис. 5. Ландшафтно-геохимические районы Южного Прибайкалья:

- 1 — Байкальский горно-склоновый и подгорно-равнинный таёжный;*
 - 2 — Слюдянский горно-склоновый и горно-долинный таёжно-подтаёжный;*
 - 3 — Листвянский горно-склоновый и предгорно-равнинный таёжно-подтаёжный;*
 - 4 — Голоустненский горно-склоновый и предгорно-равнинный таёжно-подтаёжный;*
 - 5 — Бугульдейский предгорно-подгорный таёжно-подтаёжный;*
 - 6 — Крестовский горно-склоновый подтаёжный с участками остепнённых лугов и горных степей;*
 - 7 — Еланцинский холмисто-низкогорный подтаёжно-остепнённый;*
 - 8 — Онгуренский горно-склоновый подтаёжно-остепнённый*
- Fig. 5. Landscape and geochemical areas of Southern Baikal region:*
- 1 — Baikalsk mountain-slope and spring-lowland taiga;*
 - 2 — Shlyudyanka mountain-slope and mountain-valley taiga-subtaiga;*
 - 3 — Listvyanka mountain-slope and foothills-lowland taiga-subtaiga;*
 - 4 — Goloustnoye mountain-slope and foothills-lowland taiga-subtaiga;*
 - 5 — Buguldeika foothills-load-bearing taiga-subtaiga;*
 - 6 — Krestovka mountain-slope subtaiga with sections of steppe meadows and mountain steppes;*
 - 7 — Elancyhilly-low-mountain steppe subtaiga;*
 - 8 — Onguren mountain-slope steppe subtaiga*

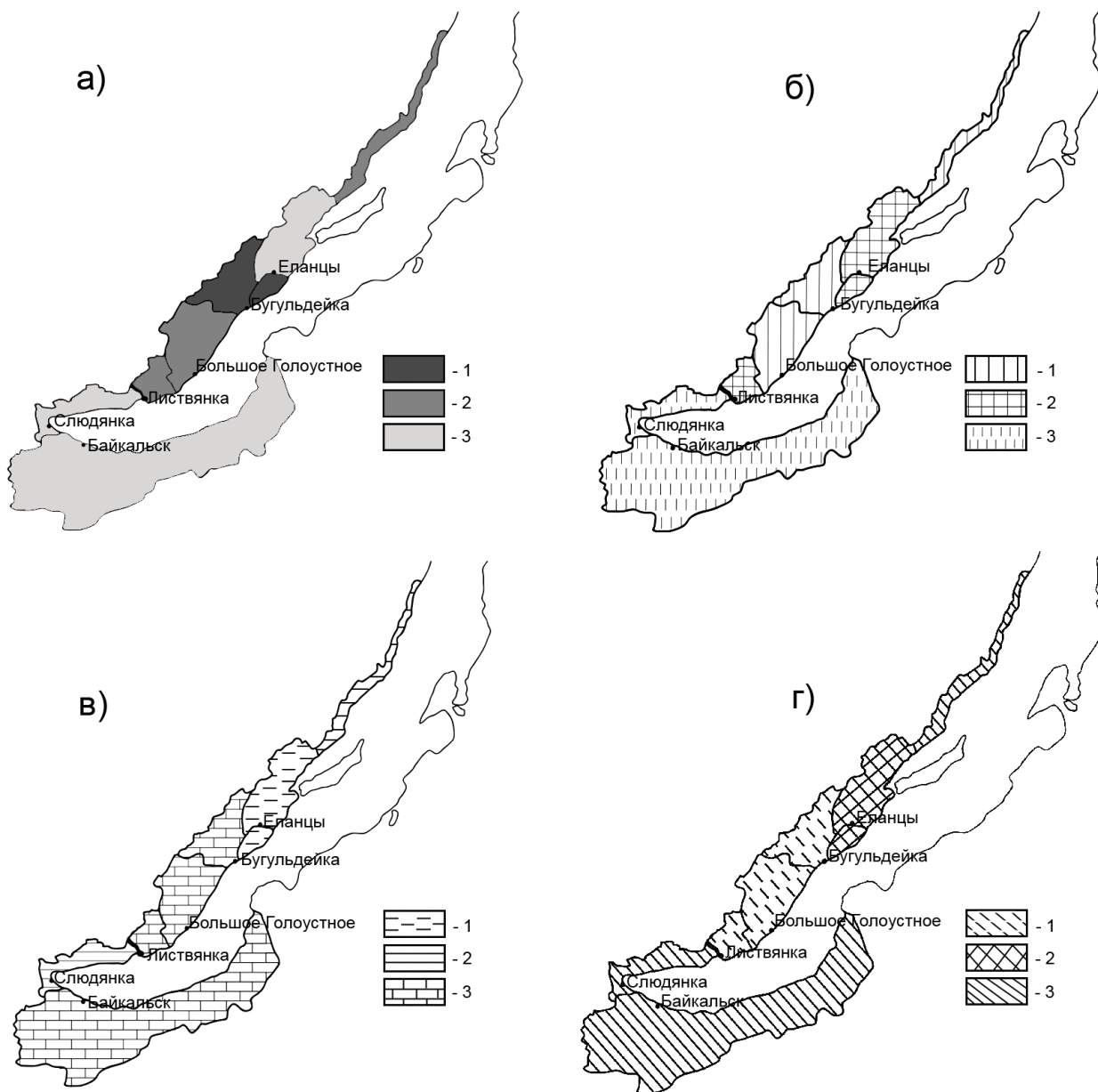


Рис. 6. Ландшафтно-гидрохимические системы Южного Прибайкалья, выделенные:

- а) по минерализации: 1 — выше средней, 2 — средняя, 3 — ниже средней;
 б) по макроэлементному составу: 1 — магниевый, 2 — натриево-магниевый,
 3 — магниевый-натриевый; в) по микроэлементному составу:
 1 — молибденово-ванадиевый, 2 — железо-алюминиевый, 3 — смешанный;
 г) по дренируемым породам: 1 — алюмосиликатные кислые, 2 — алюмосиликатные
 кислые и щелочные, 3 — алюмосиликатные щелочные и карбонатные

Fig. 6. Landscape-hydrochemical systems of Southern Baikal region, selected:
 a) by mineralization: 1 — above average, 2 — above average, 3 — below average;
 b) by macroelement composition: 1 — magnesium, 2 — sodium-magnesium,
 3 — magnesium-sodium; c) by microelement composition: 1 — molybdenum-vanadium,
 2 — iron-aluminium, 3 — mixed; d) by drained rocks: 1 — aluminosilicate acid,
 2 — aluminosilicate acid and alkali, 3 — aluminosilicate alkali and carbonate

С целью идентификации источников загрязнения, выявления зон их влияния и структуры загрязнения оценена загрязнённость поверхностных вод и скорости ассимиляции загрязнителей в них [Semenov et al., 2019]. В качестве параметров загрязнённости рассматривались массовые расходы загрязнителей в контрольных створах, которые рассчитывались по разности между массовыми расходами загрязнителя в нижнем и верхнем створе. Сопоставление картосхем величин техногенной нагрузки на наземные экосистемы с картосхемой структуры хозяйственной деятельности позволило выявить основные антропогенные источники загрязнения, которыми оказались котельные, работающие на угле, и поверхностный сток с урбанизированных территорий.

ВЫВОДЫ

Сформулированы основные подходы к методологии геоэкологического мониторинга состояния экосистем бассейна Байкала. Её разработка базируется на выявлении антропогенных источников вещества и наблюдении связей между ними и объектами среды путём рассмотрения объектов в качестве смесей, а источников в качестве их компонентов. Обоснована методика создания картографического обеспечения мониторинга структуры загрязнения и распределения загрязнителей в бассейне оз. Байкал на принципах, заложенных в учении о геосистемах. Проанализированы основные параметры ландшафтно-геохимической дифференциации бассейна, составлены карты дифференциации поверхностных вод по способности вод к самоочищению, а также схема районирования территории по способности обеспечивать тот или иной состав вод, оценена загрязнённость поверхностных вод и скорости ассимиляции загрязнителей в них. Сопоставление картосхем величин техногенной нагрузки на наземные экосистемы с картосхемой структуры хозяйственной деятельности позволяет выявить основные антропогенные источники загрязнения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование осуществлено в рамках базовых проектов № 0345–2019–0008, № 0347–2019–0003 при поддержке Правительства Иркутской области и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 17-29-05068 офи_м, 17-45-388054 р_а, 20-45-380013 р_а).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of basic projects No 0345-2019-0008, No 0347-2019-0003 with the support of the Government of the Irkutsk Region and the Russian Foundation of Basic Research (grants 17-29-05068 ofi_m, 17-45-388054r_a, 20-45-380013 r_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт А.М. Геоинформационное картографирование. М.: Астрей, 1997. 64 с.
2. Беручашвили Н.Л. Кавказ: ландшафты, модели, эксперименты. Тбилиси: Издательство Тбилисского университета, 1995. 316 с.
3. Беручашвили Н.Л. Четыре измерения ландшафта. М.: Мысль, 1986. 182 с.
4. Беручашвили Н.Л. Этология ландшафта и картографирование состояний природной среды. Тбилиси: Издательство Тбилисского университета, 1989. 198 с.
5. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008. 424 с.
6. Михеев В.С. Верхнечарская котловина. Опыт топологического изучения ландшафта. Новосибирск: Наука, 1974. 142 с.
7. Михеев В.С. Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. 208 с.
8. Михеев В.С., Ряшин В.А. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта м-ба 1: 1 500 000. М.: ГУГК, 1977.

9. Семёнов Ю.М. Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. Новосибирск: Наука, 1991. 145 с.
10. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
11. Сочава В.Б., Михеев В.С., Ряшин В.А. Обзорное ландшафтное картографирование на основе интеграции элементарных геосистем. Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока, 1965. Вып. 10. С. 9–22.
12. Шовенгерт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
13. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Издательство ИГ СО РАН, 2015. 145 с.
14. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. High-Resolution global maps of 21st Century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853.
15. Falkner K.K., Church M., Measures C. I., LeBaron G., Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.-H. Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs. *Limnology and Oceanography*, 1997. V. 42. P. 329–345.
16. Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M., Weiss R.F. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal. *Limnology and Oceanography*, 1991. V. 36. P. 413–423.
17. Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters*, 2017. V. 7. No 3. P. 250–258.
18. Mallikarjun M.B. et al. Precision mapping of boundaries of flood plain river basins using high-resolution satellite imagery: A case study of the Varuna river basin in Uttar Pradesh, India. *Journal of Earth System Science*, 2019. V. 128. Iss. 4. P. 105. DOI:10.1007/s12040-019-1146-1.
19. Pekel J-F., Cottam A. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016. V. 540. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584.
20. Semenov M., Semenov Yu., Silaev A., Begunova L. Assessing the self-purification capacity of surface waters in Lake Baikal watershed. *Water*, 2019 (a). V. 11. Iss. 7. P. 1505. DOI: 10.3390/w1107150.
21. Semenov M.Yu., Snytko V.A., Marinaite I.I., Silaev A.V., Semenov Yu.M. Indicators of pollution of surface waters of lake Baikal watershed by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Doklady Earth Sciences*, 2018. V. 483. Part 1. P. 1463–1467. DOI: 10.1134/S1028334X18110144.
22. Semenov M.Yu., Snytko V.A., Semenov Yu.M., Silayev A.V., Semenova L.N. Composition of metals of the surface water of the Southern Baikal region and its communication with landscape and geological conditions. *Doklady Earth Sciences*, 2019 (b). V. 486. No 5. P. 669–705. DOI: 10.1134/S1028334X19060205.
23. Sexton J.O., Noojipady P., Song X.-P., Anand A., McMahon S., Huang C., Feng M., Channan S., Townshend J.R. A model for the propagation of uncertainty from continuous estimates of tree cover to categorical forest cover and change. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 156. P. 418–425.

REFERENCES

1. Berlyant A.M. Geoinformation mapping. Moscow: Astreya, 1997. 64 p. (in Russian).
2. Beruchashvili N.L. Caucasus: landscapes, models, experiments. Tbilisi: Tbilisi University Press, 1995. 316 p. (in Russian).
3. Beruchashvili N.L. Etology of landscape and mapping of natural environment states. Tbilisi: Tbilisi University Press, 1989. 198 p. (in Russian).
4. Beruchashvili N.L. Four dimensions of landscape. Moscow: Mysl, 1986. 182 p. (in Russian).
5. Falkner K.K., Church M., Measures C.I., LeBaron G., Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.-H. Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs. *Limnology and Oceanography*, 1997. V. 42. P. 329–345.

6. *Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M., Weiss R.F.* The major and minor element geochemistry of Lake Baikal. *Limnology and Oceanography*, 1991. V. 36. P. 413–423.
 7. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al.* High-Resolution global maps of 21st Century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853.
 8. *Khodzher T.V., Domyshcheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V.* Current chemical composition of Lake Baikal water. *Inland Waters*, 2017. V. 7. No 3. P. 250–258.
 9. *Lake Baikal Basin Ecological Atlas*. Irkutsk: IG SB RAS, 2015. 145 p. (in Russian).
 10. *Lurie I.K.* Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of satellite images. Moscow: KDU, 2008. 424 p. (in Russian).
 11. *Mallikarjun M.B. et al.* Precision mapping of boundaries of flood plain river basins using high-resolution satellite imagery: A case study of the Varuna river basin in Uttar Pradesh, India. *Journal of Earth System Science*, 2019. V. 128. Iss. 4. P. 105. DOI: 10.1007/s12040-019-1146-1.
 12. *Mikheev V.S.* Landscape-geographical provision of complex problems of Siberia. Novosibirsk: Science, 1987. 208 p. (in Russian).
 13. *Mikheev V.S.* Verknecharskaya hollow. Experience of topological landscape study. Novosibirsk: Science, 1974. 142 p. (in Russian).
 14. *Mikheev V.S., Ryashin V.A.* Landscapes of South of Eastern Siberia. Map of scale 1: 1 500 000. Moscow: GUGK, 1977. (in Russian).
 15. *Pekel J-F., Cottam A. et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016. V. 540. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584.
 16. *Semenov M., Semenov Yu., Silaev A., Begunova L.* Assessing the self-purification capacity of surface waters in Lake Baikal watershed. *Water*, 2019. V. 11. Iss. 7. P. 1505. DOI: 10.3390/w1107150.
 17. *Semenov M.Yu., Snytko V.A., Marinaite I.I., Silaev A.V., Semenov Yu.M.* Indicators of pollution of surface waters of lake Baikal watershed by polycyclic aromatic hydrocarbons. *Doklady Earth Sciences*, 2018. V. 483. Part 1. P., 1463–1467. DOI: 10.1134/S1028334X18110144.
 18. *Semenov M.Yu., Snytko V.A., Semenov Yu.M., Silayev A.V., Semenova L.N.* Composition of metals of the surface water of the Southern Baikal region and its communication with landscape and geological conditions. *Doklady Earth Sciences*, 2019. V. 486. No 5. P. 669–705. DOI: 10.1134/S1028334X19060205.
 19. *Semenov Yu.M.* Landscape-geochemical synthesis and organization of geosystems. Novosibirsk: Science, 1991. 145 p.
 20. *Shovengert R.A.* Remote Sensing. Image processing models and techniques. Moscow: Technosphere, 2010. 560 p. (in Russian).
 21. *Sochava V.B.* Introduction to the doctrine about the geosystems. Novosibirsk: Science, 1978. 319 p. (in Russian).
 22. *Sochava V.B., Mikheev V.S., Ryashin V.A.* Overview landscape mapping based on integration of elementary geosystems. Reports of the Institute of Geography of Siberia and the Far East, 1965. Iss. 10. P. 9–22 (in Russian).
 23. *Sexton J.O., Noojipady P., Song X.-P., Anand A., McMahon S., Huang C., Feng M., Channan S., Townshend J. R.* A model for the propagation of uncertainty from continuous estimates of tree cover to categorical forest cover and change. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 156. P. 418–425.
-