

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 911.52:550.4

DOI: 10.15372/GIPR20240508

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

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

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

### ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ

Представлены основные этапы работ по изучению роли миграции вещества в дифференциации, интеграции, динамике, эволюции и антропогенной трансформации геосистем различных регионов Сибири, выполненных авторами под руководством, с участием и в развитие идей В.А. Сынтеко. В результате многолетних стационарных, полустационарных и экспедиционных ландшафтно-геохимических исследований, организатором и руководителем которых был Валериан Афанасьевич Сынтеко, изучены закономерности дифференциации и процессов динамики жидкой, газообразной и жидкой фаз вещества в геосистемах топологического ранга, установлена связь ландшафтно-геохимической цикличности с динамическими и эволюционными тенденциями в поведении геосистем, показана обусловленность структуры топогеосистем дифференциацией и потоками вещества. В результате работ на территории создаваемого Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса были изучены природные режимы компонентов таежных, подтаежных и лесостепных геосистем, выявлены тенденции развития и процессы трансформации геосистем под воздействием техногенных факторов, разработана методика экспериментального моделирования процессов взаимодействия природных и техногенных потоков вещества. Для выявления пространственно-временной структуры загрязнения бассейна оз. Байкал разработана методология геоэкологического мониторинга, которая базируется на выявлении источников загрязнения и наблюдении связей между ними и объектами среды путем рассмотрения вещества объектов в качестве смесей, а вещества источников – в качестве их компонентов. С целью обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга на геосистемы территории, не охваченных непосредственными наблюдениями, и показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем разработана методика картографирования пространственно-временной структуры загрязнения водосборного бассейна оз. Байкал на основе использования разновременных картографических источников, данных дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа, глобальных цифровых баз данных, материалов государственной статистики и полевых исследований.

**Ключевые слова:** миграция вещества, дифференциация, интеграция, динамика, эволюция, антропогенная трансформация.

Yu.M. SEMENOV\*, M.Yu. SEMENOV\*\*, 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, anton\_s@bk.ru

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

### LANDSCAPE-GEOCHEMICAL APPROACH TO THE STUDY OF SPATIO-TEMPORAL ORGANIZATION OF GEOSYSTEMS

The article presents the main stages of work on the study of the role of migration of matter in the differentiation, integration, dynamics, evolution and anthropogenic transformation of geosystems of various regions of Siberia, carried out by the authors

*under the guidance, with the participation and in development of the ideas of V.A. Snytko. As a result of many years of stationary, semi-stationary and expeditionary landscape-geochemical studies, the organizer and leader of which was Valerian Afanasyevich Snytko, the patterns of differentiation and processes of dynamics of liquid, gaseous and living phases of matter in topological geosystems were studied, the connection of landscape-geochemical cyclicity with dynamic and evolutionary trends in the behavior of geosystems was established, and the conditioning of the structure of topogeosystems by differentiation and flows of matter was shown. As a result of work within the territory of the created Kansk-Achinsk fuel and energy complex, the natural regimes of the components of taiga, sub-taiga and forest-steppe geosystems were studied, trends in the development and processes of transformation of geosystems under the influence of technogenic factors were identified, and a methodology for experimental modeling of the processes of interaction of natural and technogenic flows of matter was developed. In order to identify the spatial and temporal structure of pollution of the Lake Baikal basin, a geoecological monitoring methodology has been developed, which is based on identifying sources of pollution and observing the connections between them and environmental objects by considering the substances of objects as mixtures, and the substances of sources as their components. In order to substantiate the network of observations and control, extrapolate the results of monitoring to geosystems of the territories not covered by direct observations, and to display operational information on the state of geosystems and ecosystems, a methodology has been developed for mapping the spatio-temporal structure of pollution in the catchment basin of Lake Baikal based on the use of different time cartographic sources, remote sensing data, digital terrain models, global digital databases, materials of state statistics and field studies.*

**Keywords:** migration of matter, differentiation, integration, dynamics, evolution, anthropogenic transformation.

## ВВЕДЕНИЕ

Начало изучения показателей миграции вещества, отражающих пространственные и временные особенности функционирования геосистем Сибири, было положено Валерианом Афанасьевичем Сынтеко. Результаты его первых научных работ по выявлению геохимических свойств южнотаежных геосистем Приангарья привели к написанию кандидатской диссертации «Ландшафтно-геохимические особенности южной темнохвойной тайги Нижнего Приангарья» [1], выполненной под руководством М.А. Глазовской, и обстоятельной главы в коллективной монографии «Южная тайга Приангарья» [2].

В 1960-х гг. по инициативе и под руководством академика В.Б. Сочавы была создана сеть сибирских комплексных географических стационаров для проведения исследований динамики геосистем с использованием геохимических, геофизических и биогеоценологических методов. Валериан Афанасьевич осуществлял общее руководство ландшафтно-геохимическими работами на всех стационарах института, но на начальном этапе их работы основным полигоном стал Харанорский степной стационар, где были детально изучены особенности ландшафтной структуры Онон-Аргунской степи, проанализированы природные режимы, выявлены циклические изменения и тенденции развития ландшафтно-геофизических, ландшафтно-геохимических и биотических процессов в геосистемах, предложены подходы к их моделированию и прогнозированию. Результаты этих исследований получили отражение в ставших классическими коллективными монографиях «Топология степных геосистем» [3] и «Изучение степных геосистем во времени» [4]. Здесь был получен первый опыт систематического стационарного географического изучения Сибири, отработаны принципы и методы комплексного исследования режимов природных процессов, впервые была сделана попытка количественно оценить взаимосвязи между отдельными компонентами геосистем в процессе их динамики, что во многом способствовало созданию учения о геосистемах В.Б. Сочавы [5]. Значительным вкладом в развитие этого учения послужили монография «Геохимические исследования метаболизма в геосистемах» [6] и докторская диссертация «Проблемы динамики вещества в геосистемах южных регионов Сибири» [7], в которых В.А. Сынтеко обобщил опыт ландшафтно-геохимического анализа структурно-функциональной организации геосистем.

Известно, что формирование структуры геосистем, их развитие и антропогенная трансформация представляют собой результаты взаимосвязанных и взаимообусловленных процессов миграции вещества. Поскольку организация геосистем отражается в дифференциации их вещественной составляющей, то возникающие при этом определенная последовательность изменения и пространственные сочетания характеристик вещества геосистем могут служить индикаторами тех или иных природных процессов и показателями степени воздействия соответствующих факторов ландшафтообразования. Вместе с тем признание обусловленности дифференциации, интеграции и развития геосистем потоками вещества не может отрицать роли влияния антропогенного фактора на их поведение, т. е. того факта, что в разных обстоятельствах причина и следствие могут меняться местами [8].

На основании многолетних ландшафтно-геохимических исследований В.А. Сынтеко его учениками и последователями была оценена роль дифференциации вещества в организации геосистем топологической и региональной размерностей, сформулированы принципы ландшафтно-геохимического анализа, синтеза, диагноза, прогноза и оценки.

Цель настоящей публикации — показать основные этапы исследований роли миграции вещества в дифференциации, интеграции, динамике, эволюции и антропогенной трансформации геосистем, выполненных под руководством, с участием и в развитие идей выдающегося физико-географа и геохимика-ландшафтолога Валериана Афанасьевича Снытко.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В статье представлены основные этапы работ по изучению роли миграции вещества в ландшафтной организации. Объектами этих исследований служили геосистемы различных регионов Сибири. Основными территориями, на которых проводились многолетние стационарные, полустационарные и экспедиционные ландшафтно-геохимические исследования, были Онон-Аргунская степь (юго-восток Забайкалья), Назаровская котловина с ее горным обрамлением (центральные районы Средней Сибири) и водосборный бассейн оз. Байкал.

В юго-восточном Забайкалье на Харанорском степном физико-географическом стационаре и его окрестностях помимо традиционных синтопных и синхронных наблюдений за природными режимами проводились детальные исследования ландшафтной структуры Онон-Аргунской степи и роли миграции вещества в ее формировании. С целью познания механизмов дифференциации и интеграции геосистем в геомерах и геохорах определялись запасы вещества в компонентах топогеосистем, их амплитуды для каждого иерархического ранга и различия внутри таксонов. Понимание рисунка геохор как отражения дифференциации вещества позволило выйти на сопряженное картографирование геомеров и геохор. Для выявления динамических и эволюционных тенденций проведены полустационарное изучение солевого режима почв и режимные наблюдения за радиальной миграцией водорасторимых соединений с помощью хроматографических колонок.

В Назаровской котловине на территории создаваемого Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) на Назаровском таежном и Березовском лесостепном стационарах проводились наблюдения за природными режимами таежных, подтаежных и лесостепных геосистем, выявлялись тенденции развития и техногенной трансформации геосистем. Исследования включали полустационарные эксперименты с использованием хроматографических лизиметрических колонок для оценки радиальной миграции вещества в почвах и стационарные эксперименты с внесением на поверхность почв наиболее распространенных лесостепных геосистем различных загрязнителей (угольной пыли, пыли вскрытых пород и золы ГРЭС) для выявления характера и степени изменения вещества геосистем. Обоснование ландшафтно-геохимических подходов к оценке устойчивости природных образований и экологическому нормированию базировалось на результатах использования разработанной методики экспериментального моделирования процессов взаимодействия природных и техногенных потоков вещества, включающей в соответствии с объектами и методами полевой стационарный, лабораторный, базовый стационарный и активный полевой эксперименты.

Для выявления пространственно-временной структуры загрязнения бассейна оз. Байкал разработана методология геоэкологического мониторинга, которая базируется на выявлении источников загрязнения и наблюдении связей между ними и объектами среды через рассмотрение вещества объектов в качестве смесей, а вещества источников — в качестве их компонентов. С целью обоснования сети наблюдений и контроля экстраполяции результатов мониторинга на геосистемы территорий, не охваченных непосредственными наблюдениями, и показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем разработана методика картографирования пространственно-временной структуры загрязнения водосборного бассейна озера Байкал на основе использования разновременных картографических источников, данных дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа, глобальных цифровых баз данных, материалов государственной статистики и полевых исследований.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Дифференциация и интеграция геосистем.** Наряду с традиционными синтопными и синхронными наблюдениями за природными режимами, для контроля циклических изменений в геосистемах и выявления тенденций развития ландшафтно-геохимических процессов на Харанорском степном физико-географическом стационаре проводились детальные исследования ландшафтной структуры Онон-Аргунской степи и роли миграции вещества в ее формировании. Изучение поведения вещества в геосистемах различных уровней организации, направленное на познание механизмов их дифференциации и интеграции, проводилось одновременно в объектах ландшафтно-геохимического анализа

(геомерах) и синтеза (геохорах). С этой целью определялись запасы вещества в компонентах наиболее распространенных топогеомеров, их амплитуды для каждого иерархического ранга и различия внутри таксонов. Многолетние исследования показали, что дифференциация и интеграция геосистем связанны с различными процессами распределения и движения вещества [9].

Дифференциация геомеров топологического уровня определяется радиальной дифференциацией вещества, при этом для каждого ранга из иерархии характерны соответствующие амплитуды запасов вещества в почвах и фитомассе, возрастающие с рангом таксона. Это позволяет классифицировать геомеры с использованием результатов ландшафтно-геохимического анализа геосистем через учет абсолютных количеств вещества в их компонентах. Интеграция топогеосистем хорологического ряда классификации обусловливается латеральными потоками вещества, поэтому выявление особенностей его дифференциации здесь базируется на показателях взаимосвязи и взаимообусловленности миграции вещества в сопряженных топогеосистемах. Для геохор топологической размерности характерны односторонняя миграция и единый баланс дифференциации вещества, причем всем рангам геохор соответствуют конкретные ранги геомеров с определенными лимитами изменчивости количеств вещества в компонентах подчиненных геомеров, ареалы распространения которых ограничиваются рамками данных геохор [10, 11].

Наиболее проста картина потоков в геохорах пологих склонов, где вещество мигрирует главным образом с латеральными фронтальными потоками, а наиболее сложная система дифференциации вещества наблюдается в геосистемах на стыке разнонаправленных потоков вещества, например, в трансэлювиально-аккумулятивных микрогеохорах речных долин, сформировавшихся при участии вещества, как движущегося по склонам, так и принесенного речными водами.

Совместные исследования структуры степных топогеосистем и дифференциации вещества привели к пониманию рисунка геохор как отражения дифференциации вещества, что позволило выйти на сопряженное картографирование геомеров и геохор. Методика составления ландшафтных карт с одновременным показом геомеров и геохор дает возможность отобразить на одной карте мозаику геохор в их естественных границах и выделы геомеров, отображаемых в зависимости от масштаба и уровня генерализации [12].

Дальнейшие картографические работы показали эффективность использования ландшафтно-геохимических принципов в типизации при районировании геосистем. В целях выявления вещественно-энергетических критериев ландшафтной дифференциации и интеграции разработаны региональные иерархические таблицы соответствия таксонов сопряженных геомеров и геохор диапазонам вещественных параметров их компонентов с учетом антропогенной составляющей.

**Динамика и эволюция геосистем.** Начатые в юго-восточном Забайкалье и продолженные в других регионах Сибири стационарные и полустационарные работы показали возможность диагностики эволюционных и динамических трендов геосистем с использованием показателей радиальной дифференциации и миграции вещества в почвах [13–16].

Каждому изменению состояния геосистем отвечают определенные диапазоны их геохимических параметров. Основными моментами в изучении временной организации геосистем через исследование дифференциации вещества являются установление цикличности поведения ландшафтно-геохимических показателей или отсутствие таковой и определение тенденций развития природных образований на базе диагностики их состояний. Все изменения характеристик вещества, приводящие к трансформации структуры геосистем без смены их инварианта (в основном затрагивающие только миграцию подвижных соединений), рассматриваются как показатели динамики геосистем, а смены самих инвариантов (трансформация профильного строения почв или их валового состава) — как показатели эволюции [8, 14].

Важнейшую задачу при этом представляет собой диагностика состояний геосистем. Изучение радиальной миграции вещества геосистем Онон-Аргунской степи с помощью наблюдений за режимами содержаний водорастворимых соединений, прямого учета мигрирующего вещества методом лизиметрических хроматографических колонок и микроморфологических исследований процессов почвообразования позволило разграничить элементарные геомеры по их динамическому состоянию. Диагностика динамического состояния по вышеизложенным показателям дает возможность четко дифференцировать коренные, мнимокоренные и серийные геосистемы [13–15].

Выяснилось, что для коренных геомеров характерны стабильный режим и относительно невысокая интенсивность радиальной миграции вещества, отсутствие в микростроении почв признаков почвообразующих процессов, противоположных или сопутствующих основному. Хотя интенсивность миграции вещества в коренных геосистемах невелика по сравнению с другими геомерами, близкими

по свойствам и месту в классификации, ее абсолютные размеры иногда могут быть довольно значительными. Серийные геомеры отличаются резко выраженной радиальной миграцией вещества, а в микроморфологии почв хорошо диагностируются признаки сопутствующих или противоположно направленных почвообразующих процессов. Для процессов в минимокоренных элементарных геомерах характерны показатели, промежуточные между таковыми коренных и серийных геосистем: миграция вещества относительно стабильна, но в микростроении почв отражаются признаки нескольких почвообразующих процессов [13].

Реконструкция эволюции геосистем базировалась на положении о соответствии ландшафтно-геохимических обстановок определенным условиям их существования [14]. Такой подход не позволяет произвести абсолютную датировку обстановок, но их последовательность диагностируется довольно четко. Большую роль в изучении эволюции геосистем играет анализ геохимических циклов миграции вещества [16].

Стационарное изучение дифференциации вещества дает возможность сопоставить современные циклы миграции с более длительными, которые рассматриваются как фоновые, а использование метода балансов помогает понять направленность эволюции геосистем через показатели миграции вещества. Определение балансов вполне возможно через использование результатов режимных наблюдений за ходом природных процессов. Наряду с полными балансами при этом имеют право на существование и частные балансы. Например, можно предположить, что разность показателей двух сроков наблюдений уже представляет собой сальдо баланса. Такие сальдо рассчитываются для разных промежутков времени. Примерами балансов подобного типа являются балансы радиальной миграции подвижных соединений в профиле почвы или запасов водорастворимых солей при анализе солевого режима почв [14].

**Антропогенная трансформация геосистем и ландшафтно-геохимический прогноз.** В результате работ на территории создаваемого Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) были изучены природные режимы компонентов таежных, подтаежных и лесостепных геосистем, выявлены тенденции развития и процессы трансформации геосистем под воздействием техногенных факторов, разработана методика экспериментального моделирования процессов взаимодействия природных и техногенных потоков вещества [8, 15–19].

Исследования включали полустационарные эксперименты с использованием хроматографических лизиметрических колонок для выявления масштабов и особенностей радиальной миграции вещества в почвах Назаровской котловины, а также коллективные стационарные эксперименты с внесением на поверхность почв наиболее распространенных лесостепных геосистем различных загрязнителей (угольной пыли, пыли вскрышных пород и золы ГРЭС) для выявления характера и степени изменения вещества геосистем западного участка КАТЭКа под воздействием техногенного фактора, определения норм допустимых нагрузок и обоснования экологических ограничений. В соответствии с объектами и методами они подразделялись на полевой стационарный, лабораторный, базовый стационарный и активный полевой эксперименты.

Применение полевого стационарного эксперимента позволило установить характер воздействия пыли вскрышных пород, угля и золы ГРЭС на запасы водно-растворимых форм элементов, содержание обменных оснований и масштабы выноса подвижных соединений в почвах зоны влияния выбросов объектов КАТЭКа. На основании лабораторного эксперимента был выявлен общий ход процесса взаимодействия техногенного вещества с органоминеральной массой и поглощающим комплексом почв. В ходе базового стационарного эксперимента загрязнения геосистем золой ГРЭС установлены пороговые значения доз загрязнителя, приводящие к определенным негативным или положительным эффектам последствий его воздействия на геосистемы. В результате активного полевого эксперимента выявлены механизмы трансформации летучей золы ГРЭС в модельных агроценозах, установлены допустимый, критический и недопустимый уровни техногенной нагрузки, определены количественные показатели изменения вещества компонентов геосистем при длительном воздействии загрязнителя. Совместное использование данных стационарного изучения режимов миграции вещества геосистем, экспериментального моделирования и картографических методов позволило прогнозировать годовое поступление золы ГРЭС в геосистемы и вероятные сроки их загрязнения, приводящие к достижению критического и недопустимого уровней техногенных нагрузок [8, 19]. Опыт этих исследований позволил выйти на разработку ландшафтно-геохимических подходов к оценке устойчивости природных образований и экологическому нормированию [20].

Для оценки природного потенциала западного участка КАТЭКа была составлена картографическая серия, включающая ландшафтную (с одновременным отображением геомеров и геохор), ландшафтно-

геохимическую и ландшафтно-оценочные (сельскохозяйственной, инженерной, рекреационной и интегральной оценки геосистем) карты и прогнозную картосхему устойчивости геосистем к аэральному техногенному загрязнению с использованием пространственно-временной экстраполяции динамических трендов геосистем [8, 21–23]. На данной картосхеме показаны ареалы природных образований, ранжированные по коэффициенту устойчивости, который рассчитывался с учетом ряда ландшафтно-морфологических, ландшафтно-геофизических и ландшафтно-геохимических показателей. Анализ этих показателей и расчет коэффициента устойчивости для геоморфов и геохор позволили разработать матрицу сопряженного сравнения групп фаций различных макро- и топогеохор: в матрице и на схеме выделяются геосистемы с высокой, достаточно высокой, умеренной, достаточно умеренной и низкой степенью устойчивости [23].

**Мониторинг пространственно-временной структуры загрязнения бассейна оз. Байкал.** Следует отметить также важную роль Валериана Афанасьевича Снытко в выявлении пространственно-временной структуры загрязнения бассейна оз. Байкал на базе анализа его ландшафтной организации и законоомерностей распределения загрязнителей. Преобладающими агентами массопереноса в бассейне Байкала служат воды, поэтому при создании базы данных и разработке концепции формирования состава вещества компонентов геосистем использовались результаты изучения пространственного разнообразия состава поверхностных вод и роли разных источников растворенного вещества в их дифференциации. Созданная методология геоэкологического мониторинга базируется на выявлении источников загрязнения и наблюдении связей между ними и объектами среды путем рассмотрения техногенного вещества объектов в виде смесей, а вещества источников — в роли их компонентов [24]. Показателем тесноты связи между источником и объектом загрязнения служит величина вклада источника в загрязнение объекта [25, 26]. О связи загрязнителей в природных средах с источниками загрязнения судили по близости их точек на диаграммах смешения в координатах величин отношений-трассеров [27, 28].

Оценка вкладов притоков в состав металлов воды Байкала осуществлена на основе псевдотрехмерной геометрической модели четырехкомпонентного смешения путем решения систем линейных уравнений, а выявление связи состава металлов с источниками растворенного вещества — путем расчета коэффициентов водной миграции. Оказалось, что микроэлементный состав вод ряда притоков не всегда характерен для ландшафтов, в которых он формируется, так как его источником являются глубокие подземные воды (воды регионального стока) [29]. Вклады притоков в состав ПАУ были оценены на основе степени разложения органического вещества воды Байкала и его притоков [30]. Для идентификации источников загрязнения, выявления зон их влияния и структуры загрязнения были оценены загрязненность поверхностных вод и скорости асимиляции загрязнителей (минерального азота, органического углерода, ПАУ и микроэлементов) в них [31]. На базе результатов оценки скорости удаления (ассимиляции) или поступления загрязнителя разработан подход к сопряженной оценке величин допустимых нагрузок загрязнителей на водные и наземные экосистемы по разности его массового расхода в нижнем и верхнем створах выбранного участка реки. Его особенностью является возможность расчета нагрузок для отдельных участков реки и ее бассейна в любые периоды времени. Для расширения возможностей метода необходимы исследования, направленные на выявление механизмов самоочищения водных экосистем [32].

Разработана методика картографирования пространственно-временной структуры загрязнения водосборного бассейна оз. Байкал на основе использования разновременных картографических источников, данных дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа, глобальных цифровых баз данных, материалов государственной статистики и полевых исследований с применением методов статистического анализа. Для обоснования сети наблюдений и контроля, экстраполяции результатов мониторинга на геосистемы территорий, не охваченных непосредственными наблюдениями, и показа оперативной информации о состоянии геосистем и экосистем использовался комплекс методов ландшафтного картографирования, предложенный для обоснования целей рационального природопользования [33].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение показателей миграции вещества, отражающих пространственные и временные особенности функционирования геосистем Сибири, начатое В.А. Снытко более 60 лет назад, привело к пониманию роли дифференциации вещества в организации геосистем.

На основании многолетних стационарных и полустационарных ландшафтно-геохимических исследований Валерианом Афанасьевичем, его учениками и последователями были изучены и проанализированы природные режимы геосистем, выявлены циклические изменения и тенденции развития ландшафтно-геохимических процессов в геосистемах, предложены подходы к их моделированию и прогнозированию, выявлены тенденции развития и процессы трансформации геосистем под воздействием техногенных факторов, разработана методика экспериментального моделирования процессов взаимодействия природных и техногенных потоков вещества, сформулированы принципы ландшафтно-геохимического анализа, синтеза, диагноза, прогноза и оценки. Для бассейна оз. Байкал разработана методология геоэкологического мониторинга, которая 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, выполнена идентификация пространственно-временной структуры загрязнения бассейна.

В настоящее время представления о ведущей роли миграции вещества в формировании, динамике и эволюции геосистем никем не оспариваются, и современные физикогеографы, ландшафтоведы-геохимики и биогеохимики, базируясь на идеях В.А. Снытко, продолжают развивать теоретические, методические и практические аспекты этого научного направления.

*Работа выполнена за счет средств государственных заданий Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (AAAA-A21-121012190059-5) и Лимнологического института СО РАН (AAAA-A21-121032300199-9).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снытко В.А. Ландшафтно-геохимические особенности южной темнохвойной тайги Нижнего Приангарья: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1966. — 25 с.
2. Южная тайга Приангарья: Структура и природные режимы южнотаежного ландшафта / Отв. ред. акад. В.Б. Сочава. — Л.: Наука, 1969. — 267 с.
3. Топология степных геосистем / Отв. ред. акад. В.Б. Сочава. — Л.: Наука, 1970. — 174 с.
4. Изучение степных геосистем во времени / Отв. ред. акад. В.Б. Сочава. — Новосибирск: Наука, 1976. — 237 с.
5. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 319 с.
6. Снытко В.А. Геохимические исследования метаболизма в геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 149 с.
7. Снытко В.А. Проблемы динамики вещества в геосистемах южных регионов Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. — 36 с.
8. Семёнов Ю.М. Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. — Новосибирск: Наука, 1991. — 144 с.
9. Semenov Yu.M. Structure of Topogeochores and Modern Landscape-Geochemical Processes // Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales. Landscape Series. — 2020. — Vol. 26. — P. 153–161.
10. Снытко В.А., Семёнов Ю.М. Микрогохоры как отражение дифференциации вещества в геосистемах // Докл. АН СССР. — 1979. — Т. 244, № 2. — С. 455–457.
11. Снытко В.А., Семёнов Ю.М. Структура степных топогеосистем и дифференциация вещества в них // География и природ. ресурсы. — 1980. — № 2. — С. 39–50.
12. Снытко В.А., Семёнов Ю.М. Опыт сопряженного картографирования геомеров и геохор // География и природ. ресурсы. — 1981. — № 4. — С. 28–37.
13. Вещество в степных геосистемах (на примере Забайкалья) / Ред. В.А. Снытко. — Новосибирск: Наука, 1984. — 158 с.
14. Семёнов Ю.М. Диагностика эволюционных и динамических трендов геосистем // Геодинамика и эволюция Земли. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. — С. 224–226.
15. Семёнов Ю.М., Данько Л.В., Семёнова Л.Н., Палкин О.Ю., Семёнов М.Ю. Лизиметрическая диагностика развития геосистем // География и природ. ресурсы. — 2002. — № 3. — С. 110–120.
16. Семёнов Ю.М., Семёнов М.Ю., Снытко В.А. Использование ландшафтно-геохимических принципов в классификации геосистем и их компонентов // Ландшафтная география в XXI веке. — Симферополь: Типография «Ариал», 2018. — С. 65–67.
17. Снытко В.А., Семёнов Ю.М., Мартынов А.В. Ландшафтно-геохимический анализ геосистем КАТЭКа. — Новосибирск: Наука, 1987. — 109 с.
18. Snytko V.A., Semenov Yu.M., Martynov A.V. The landscape ecological interpretation of data about the relation between natural and technogenic flows of substance // Ecology. — 1990. — Vol. 9, N 4. — P. 395–403.
19. Семёнов Ю.М., Чернегова Л.Г., Дубынина С.С., Мамитко А.В., Семёнова Л.Н. Географический эксперимент как основа разработки норм природопользования // Оптимизация геосистем. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО АН СССР, 1991. — С. 36–52.

20. **Биогеохимические основы экологического нормирования** / Отв. ред. М.В. Иванов, В.Н. Башкин, В.В. Снажин. — М.: Наука, 1993. — 304 с.
21. **Семёнов Ю.М., Суворов Е.Г., Мартынов В.П., Палкин О.Ю.** Серия карт как база ландшафтного мониторинга // Ресурсно-экологическое картографирование Сибири на основе современных информационных технологий. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1993. — С. 37–38.
22. **Семёнов Ю.М.** Опыт пространственно-временной экстраполяции динамических трендов геосистем // География и природ. ресурсы. — 1995. — № 1. — С. 15–23.
23. **Semenov Yu.** Landscape-Geochemical Study of Geosystem Stability to Alkaline Deposition // Proceedings of fifth joint seminar on regional deposition process in the atmosphere. — Seoul, Korea: Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University, 1999. — P. 163–169.
24. **Семёнов Ю.М., Семёнов М.Ю., Снытко В.А., Силаев А.В.** Ландшафтно-экологический подход к выявлению закономерностей распределения загрязнителей в бассейне озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 2. — С. 69–76.
25. **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, N 10. — P. 901–916.
26. **Semenov M., Silaev A., Semenov Yu., Begunova L.** Using Si, Al and Fe as Tracers for Source Apportionment of Air Pollutants in Lake Baikal Snowpack // Sustainability. — 2020. — Vol. 12, N 8. — P. 3392.
27. **Christophersen N., Hooper R.P.** Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal component analysis for the end-member mixing problem // Water Resources Research. — 1992. — Vol. 28. — P. 99–107.
28. **Семёнов М.Ю., Снытко В.А.** Оптимизация подходов к моделированию химического состава речных вод // Докл. РАН. — 2013. — № 453 (6). — С. 686–689.
29. **Семёнов М.Ю., Семёнов Ю.М., Силаев А.В., Бегунова Л.А.** Растворенное вещество вод юго-западного Прибайкалья: состав, происхождение, классификация // География и природ. ресурсы. — 2020. — № 5. — С. 92–99.
30. **Семёнов М.Ю., Снытко В.А., Маринайте И.И., Силаев А.В., Семёнов Ю.М.** Показатели загрязнения поверхностных вод бассейна озера Байкал полициклическими ароматическими углеводородами // Докл. РАН. — 2018. — Т. 483, № 2. — С. 212–215.
31. **Semenov M., Semenov Yu., Silaev A., Begunova L.** Assessing the Self-purification Capacity of Surface Waters in Lake Baikal Watershed // Water. — 2019. — Vol. 11, Iss. 7. — P. 1505.
32. **Семёнов М.Ю., Снытко В.А., Силаев А.В., Семёнов Ю.М.** Сопряженная оценка величин допустимых нагрузок загрязнителей на водные и наземные экосистемы (на примере бассейна Селенги) // Докл. РАН. Сер. Науки о Земле. — 2020. — № 6. — С. 77–86.
33. **Силаев А.В., Семёнов Ю.М., Семёнов М.Ю.** Основные подходы к геоинформационному моделированию экологического состояния бассейна оз. Байкал // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2020. — Т. 26, ч. 4. — С. 46–59.

Поступила в редакцию 17.10.2024

После доработки 20.10.2024

Принята к публикации 31.10.2024