

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В СИБИРИ

© 2022 г. И. В. Бычков^{а,*}, Е. С. Фереферов^{а,**}

^а Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: bychkov@icc.ru

**E-mail: fereferov@icc.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 08.01.2022 г.

Статья посвящена экологическому мониторингу Сибири. Представлены региональные особенности экологических проблем, предложен комплексный подход к организации цифрового мониторинга как инструмента понимания происходящего и его прогнозирования. Рассмотрен подход к цифровизации экологического мониторинга на основе цифровых платформ, обеспечивающих сбор, хранение, обработку больших объёмов данных в распределённой сети датчиков, спутниковой информации, а также сервисов для моделирования и прогнозирования. Приводятся результаты цифрового мониторинга байкальской природной территории. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на заседании президиума РАН 22 июня 2021 г.

Ключевые слова: экология, антропогенное воздействие, цифровой мониторинг, цифровая платформа, WPS-сервис, моделирование, прогнозирование.

DOI: 10.31857/S086958732204003X

Сибирский федеральный округ (СФО) включает в себя огромную территорию (общая площадь – 4361.8 тыс. км²) с удивительной и неповторимой природой, он богат природными ресурсами и полезными ископаемыми. Численность населения СФО – около 17 млн человек, плотность населения невелика – 3.9 на 1 км². Валовой региональный продукт – 7134 млрд руб.



БЫЧКОВ Игорь Вячеславович – академик РАН, директор ИДСТУ им. В.М. Матросова СО РАН.
ФЕРЕФЕРОВ Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, учёный секретарь ИДСТУ им. В.М. Матросова СО РАН.

Бурное развитие промышленности, активная добыча полезных ископаемых, непродуманные способы ведения сельского хозяйства в регионе оказывают пагубное влияние на природу, приводят к росту риска для жизни и здоровья населения [1, 2]. Экологическая ситуация в округе весьма контрастная. На севере и в центральной части – относительно удовлетворительная (можно отметить локальное загрязнение рек); в южной части – острая (что обусловлено засолением и дефляцией почв, деградацией лесов); в районах расположения крупных городов и административных центров – очень острая (ввиду промышленного загрязнения атмосферы, вод и почв). Экологически неблагоприятными сегодня признаны города Красноярск, Норильск, Абакан, Ангарск, Искитим, Иркутск, Зима, Братск, Кызыл, Лесосибирск.

Несмотря на малонаселённость СФО, в регионе присутствует весь спектр экологических проблем. В числе наиболее острых назовём следующие.

- Антропогенное технологическое воздействие и загрязнение атмосферы, водных ресурсов, почвенного покрова промышленными предприятиями металлургического, топливно-энергетическо-

го, горнодобывающего, лесопромышленного, нефтегазодобывающего комплексов.

- Экологические аварии и катастрофы. Проблемы природно-техногенной безопасности стратегических, критически важных и потенциально опасных объектов техносферы и гидротехнических сооружений.

- Проблемы бореальных лесов Сибири (увеличение площади пожаров, эпидемиологическое поражение и рост болезней, незаконная вырубка, низкий уровень лесовосстановления).

- Значительные экологические и ландшафтные изменения, загрязнение и изменение генезиса почв, ветровая эрозия, увеличение площади нарушенных и деградированных земель.

- Проблемы сбора, утилизации и захоронения бытовых и промышленных отходов, включая радиационно-активные.

- Повышенная опасность геодинамических процессов (сейсмичность, оползни, обвалы, сели и т.п.).

- Проблемы водопользования (чрезмерное загрязнение водных объектов, нерегулируемое потребление и т.д.).

- Обострение санитарно-эпидемиологической обстановки.

- Изменение видового состава флоры и фауны, несмотря на большие площади природоохранных территорий.

- Проблемы Сибирской Арктики (изменение климата и таяние льдов, загрязнение вод северных морей, сокращение популяции арктических животных и изменение среды их обитания).

Возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, и связанный с их неэффективным использованием рост рисков для жизни и здоровья граждан — один из семи больших вызовов, обозначенных в Стратегии научно-технологического развития России. В таблице 1 приведены данные по опасности чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного характера в субъектах Сибирского федерального округа. В большинстве случаев они оказываются следствием накопленного экологического ущерба. Надо отметить, что Иркутская область — одна из немногих, в которых отмечаются все три вида чрезвычайных ситуаций природного характера — наводнения, лесные пожары и землетрясения.

Из изложенного напрашивается вывод: возникшие проблемы природно-техногенной и экологической безопасности — результат дестабилизации системы “социум—техносфера—природная среда” (С—Т—П), вызванной игнорированием требований, выдвинутых в концепции устойчивого развития. Сегодня обостряются противоречия научно-технического прогресса: высокие

темпы роста техносферы ведут к возникновению новых угроз с её стороны человеку, обществу, природной среде. Для устойчивого развития хрупкой природной системы необходимо:

- от решения отдельных экологических проблем перейти к комплексному обеспечению природно-техногенной безопасности региона;

- организовать мониторинг природно-техногенной безопасности, что позволит своевременно стабилизировать кризисные явления в экономике, обеспечить сохранность и функционирование основных производственных фондов, а также защиту населения и территорий от ЧС природного и антропогенного характера;

- провести оценку уровня природных, техногенных и экологических рисков с целью формирования основы экономических механизмов регулирования природно-техногенной безопасности, снижения вероятности негативных последствий.

Мониторинг и прогнозирование экологической обстановки в регионах мира, в России и, в частности, в Сибири, чрезвычайно актуальны с учётом того, что взаимодействие человека и природы, влияние последствий технологического развития и других антропогенных факторов на окружающую среду — один из глобальных вызовов XXI века. Сегодня такой мониторинг рассредоточен по десяткам ведомств, использующих сотни методик, что не способствует повышению его качества, получению комплексной информации. Например, озеро Байкал изучается на протяжении более 100 лет, его экологический мониторинг обеспечивается Росгидрометом, Росрыболовством и многими другими структурами. Но когда в 2003 г. в прибрежной зоне Байкала начался кризис, оказалось, что ситуацию здесь никто не отслеживает.

Экологическое состояние ряда областей Сибири вызывает глубокую обеспокоенность как научного сообщества, так и проживающего там населения и для кардинального улучшения требует тесного взаимодействия РАН, Минобрнауки России, Минприроды России, Госкорпорации “Росатом” и других ведомств, заинтересованных организаций и бизнес-структур, региональных органов государственной власти и местного самоуправления. Для повышения качества экологического мониторинга необходимо создать информационную систему наблюдений, оценки и прогнозирования изменений в состоянии окружающей среды с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов. Такая система должна помочь не только накапливать, систематизировать и анализировать огромный массив данных, но и оценивать допустимость тех или иных нагрузок на среду в целом, резервы биосферы.

Таблица 1. Степень опасности чрезвычайных ситуаций природного характера в субъектах Сибирского федерального округа

Субъекты региона	Наводнения		Лесные пожары		Землетрясения		Общая степень опасности ЧС субъекта
	Площадь наводнения, тыс. км ²	Население в зонах наводнения, тыс. чел.	Площадь пожаров, тыс. км ²	Население в зонах пожаров, тыс. чел.	Площадь сейсмоопасной территории, тыс. км ²	Население в зонах землетрясения, тыс. чел.	
Республика Алтай	0.5	13	12	5	40	60	3
Республика Тыва	0.5	30	40	9	110	160	3
Республика Хакасия	6	95	10	7	20	70	2
Алтайский край	20	120	8	10	120	90	1
Красноярский край	3	140	1500	40	60	150	1
Иркутская область	0.9	70	180	30	160	300	1
Кемеровская область	2.7	70	16	15	130	120	1
Новосибирская область	13	300	20	15	107	320	1
Омская область	4.0	16	2.5	18	–	–	1
Томская область	3.5	40	0.9	70	–	–	1
Всего	54.1	894	1789.4	219	747	1270	–

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию фундаментальных и прикладных экологических проблем. В этой связи актуальным становится использование комплексной цифровизации¹, в частности для цифрового мониторинга экологического состояния природных территорий. Он применим как для особо охраняемых объектов – озера Байкал, Васюганских болот или сибирских бореальных лесов, от состояния которых существенно зависят погодные условия и экологическая обстановка в Сибири, на Урале и Дальнем Востоке, так и для промышленно развитых регионов, например, горнодобывающего комплекса Кузбасса.

¹ Под цифровизацией понимается процесс внедрения системного подхода к использованию цифровых ресурсов, внедрению цифровых технологий, киберфизических систем, интеграции датчиков во все компоненты оборудования, замене физических или аналоговых ресурсов цифровыми данными. (Прим. авт.)

Информационные системы поддержки отдельных аспектов экологического мониторинга разрабатываются и поддерживаются в Красноярском крае (<http://gis.krasn.ru/>) [3], в Кемеровской области (<http://biodiv.ict.sbras.ru:8080/red-book/welcome>) [4] и в ряде других регионов Сибири. В режиме реального времени они накапливают метеорологическую и климатическую информацию, обеспечивают сбор данных о загрязнении атмосферного воздуха, гидрологических наблюдений, состоянии биоразнообразия, информации о донных отложениях, почве, грунте. Среди зарубежных можно выделить глобальную сеть наблюдений за биоразнообразием GEO BON (The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network, <https://geobon.org/>). Она предназначена для улучшения сбора данных наблюдений за биоразнообразием и связанных с этой проблематикой пользовательских услуг, интересующих не только представителей научного



Рис. 1. Базовые типы цифровой платформы

сообщества, но и лиц, принимающих решения в области экологии. Отметим и национальную систему мониторинга биоразнообразия в Мексике, базирующуюся на данных дистанционного зондирования и наземной сети сбора информации с 2150 участков.

В связи с развитием в мире цифровой парадигмы приоритетом становится внедрение принципов цифровых платформ, методологии и инструментов создания прикладных модулей в решение проблем экологии. Это также связано с большими объёмами тематических и пространственно-временных данных экологического мониторинга, со значительным количеством программно-аппаратных комплексов, а также совершенствованием систем передачи данных.

На протяжении последних лет институты Сибирского отделения РАН активно участвуют в цифровой трансформации экологического мониторинга Сибири, в частности, в создании базовых типов новых цифровых платформ, цифровых двойников для прогнозирования, тематических WPS²-сервисов, позволяющих моделировать сценарии событий. Цифровая платформа — это среда накопления, обмена и управления данными в структурированном виде, а также система вызова бизнес-функций с подключёнными к ней через технологические интерфейсы сервисами участников цифровой экосистемы — регионального партнёрства участников мониторинга Сибири, поддерживающих открытый информационно-вычислительный и телекоммуникационный обмен данными, сервисами их обработки, моделями, цифровыми инструментами и услугами. В

² WPS (Web Processing Service) — стандарт реализации сервисов геопроессинга (геообработки). Геопроессинг может включать в себя любой алгоритм, расчёт или модель, которые оперируют векторными или растровыми данными с пространственной привязкой. Развитием стандарта WPS занимается OGC (Open Geospatial Consortium). (Прим. ред.)

разрабатываемом подходе выделяют три базовых типа цифровых платформ: инструментальную, инфраструктурную, прикладную (рис. 1).

Инструментальная целевая платформа обеспечивает доступ участников целевой экосистемы мониторинга Сибири к разработке и отладке прикладных информационных и программно-аппаратных средств, предоставляя им инструментальные сервисы для обработки пространственно-временных данных и их интерфейсов. Инфраструктурная цифровая платформа обеспечивает создание прикладных программно-аппаратных средств мониторинга Сибири, тематических WPS-сервисов обработки и распределённого хранения данных на основе информационно-аналитической среды, сервис-ориентированных и сквозных технологий. Прикладная цифровая платформа оперирует обработанными данными на уровне отдельной группы или вида мониторинга в целом, а также поддерживает алгоритмический обмен услугами (сервисами) между участниками цифровой экосистемы с использованием информационно-аналитической среды и технологической инфраструктуры.

Важная составляющая цифровой трансформации экологического мониторинга — обеспечение его мощными информационно-вычислительными ресурсами. Сегодня в СО РАН создаётся распределённый Центр обработки данных экологического мониторинга (рис. 2). Помимо наращивания общего дискового пространства, участники объединяют региональные центры обработки данных в единую инфраструктуру, что обеспечивает исследователям надёжное хранение накопленных данных и возможность доступа к информации о состоянии различных объектов на территории СФО. К этой инфраструктуре подключены суперкомпьютерные центры СО РАН.

Использование цифровых инструментальной и инфраструктурной платформ, сервис-ориенти-

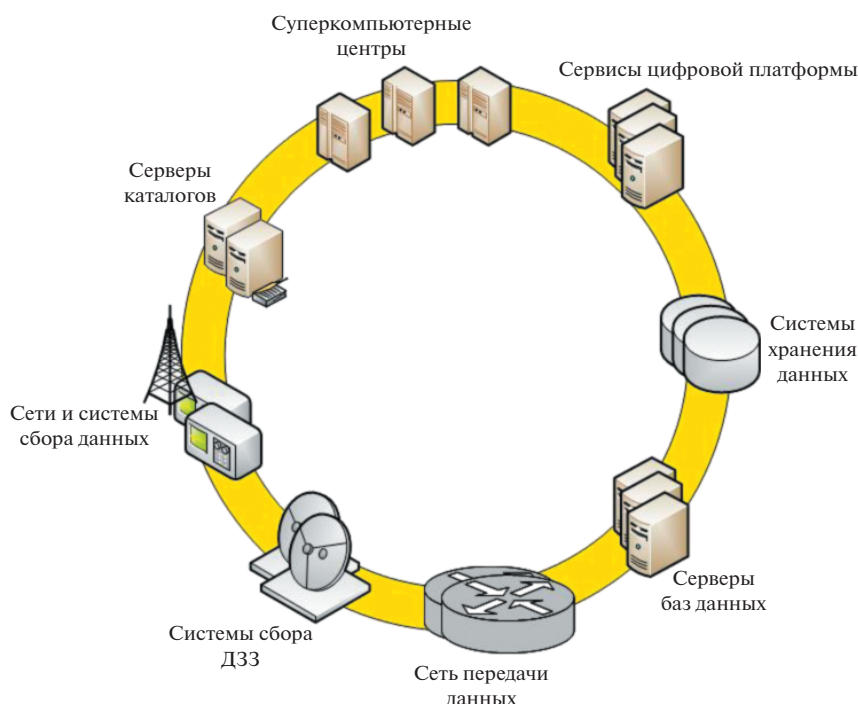


Рис. 2. Инфраструктура центров обработки данных цифрового мониторинга Сибири

рованной парадигмы, сквозных технологий, больших данных и их наполнение содержанием в форме математических и компьютерных моделей отдельных процессов и экосистем в целом, дополненных инструментами сбора и анализа данных мониторинга экосистем, в том числе получаемых с помощью дистанционного зондирования Земли и наземных сенсорных сетей, обосновывают достижимость ожидаемых результатов.

Рассмотренный подход апробирован при реализации крупного научного проекта “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”. Концептуальные основы шести научных направлений этого проекта формируются консорциумом 13 институтов СО РАН из Иркутска, Ангарска, Улан-Удэ, Томска и Новосибирска. Первое из них касается основ инструментальной, инфраструктурной и прикладных цифровых платформ экологического мониторинга, второе направление – мониторинга экстремальных природных явлений и антропогенных выбросов в атмосферу, третье – мониторинга гидрологических режимов водоёмов, четвёртое – оценки экологических рисков, связанных с состоянием растительного покрова, пятое – мониторинга экстремальных геологических и эколого-геохимических процессов, шестое – медико-экологического и эпидемиологического мониторинга.

В рамках первого направления предложена концепция цифровой трансформации научных исследований экологических проблем Байкальской природной территории (БПТ) [5] с использованием цифровой платформы как открытой системы алгоритмизированного сетевого взаимодействия, аккумулирующей в себе новейшие методы, технологии и предоставляющей доступ к большим объёмам пространственно-временных данных, сервисам их обработки, а также к цифровым инструментам и услугам. К настоящему времени уже разработаны архитектура системы хранения информации об объекте исследования, средств доступа к ней, инфраструктурная компонента цифровой платформы для отображения пространственно-временных данных в виде таблиц, диаграмм, карт, создан прототип подсистемы управления сервисами.

По второму научному направлению получены результаты непрерывного автоматического мониторинга (уровень разрешения – от минут до суток) переноса газовых примесей – SO_2 , NO/NO_2 , CO , Hg , а также метеорологических параметров, фиксируемых атмосферной станцией “Листвянка” [6]. Показано, что наиболее сильное загрязнение атмосферы в центральной экологической зоне на юге озера происходит при переносах воздушных масс с северо-запада в зимний период. Также получен непрерывный ряд данных круглосуточных измерений концентрации парниковых газов (приземный озон, оксид азота, диоксид азо-

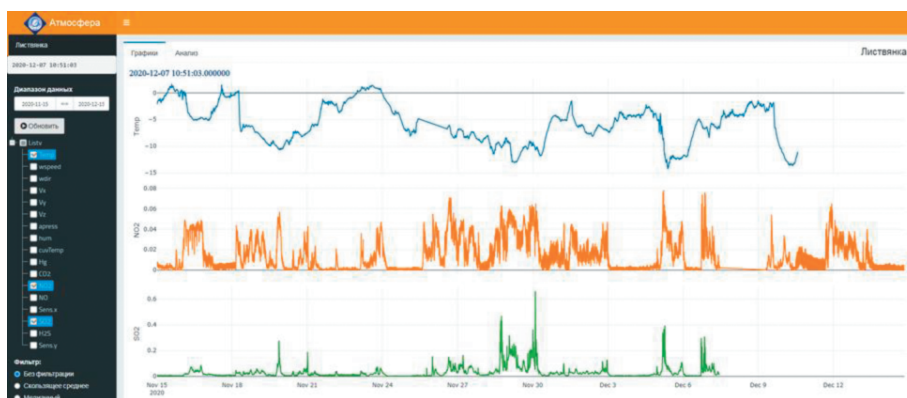


Рис. 3. Пример цифровой регистрации антропогенных примесей в атмосфере над станцией Листвянка (верхний график – температура, средний – NO_2 , нижний – SO_2)

та, диоксид серы), микрофизических характеристик аэрозоля, химического состава аэрозолей, аэрозольной оптической толщи атмосферы, метеорологических и турбулентных параметров атмосферы с использованием уникального современного оборудования (рис. 3). Исследованы энергетические объекты Байкальской природной территории. Предложена структура информации для определения их экологических характеристик. Математически описаны методы и модели определения показателей ветро-, гелио-, гео- и биопотенциала, используемых при обосновании планов сооружения возобновляемых источников энергии. Результаты этой работы дают возможность корректно сформировать структуру разрабатываемой информационно-аналитической системы и требований к её информационному наполнению для дальнейших исследований по проекту.

В рамках третьего направления (мониторинг гидрологических режимов водоёмов) разработана и введена в опытную эксплуатацию пилотная сеть станций цифрового мониторинга гидрологической обстановки на озере Байкал и впадающих притоках [7]. В их числе автономный комплекс измерения гидрофизических, гидрохимических и гидрооптических параметров литорали озера Байкал, размещённый вблизи посёлка Большие Коты [8]. Полученные данные позволили впервые детально проследить за суточными и месячными вариациями указанных параметров в переходный период от лета к зиме. Разработан и изготовлен опытный образец станции мониторинга толщины ледового покрова. Проанализированы, обработаны и верифицированы накопленные данные мониторинга уровня озера Байкал, полученные Лимнологическим институтом СО РАН в 2015–2019 гг. Сравнение их с данными Енисейского бассейнового водного управления и среднесуточными показателями постов наблюдений Иркутского и Забайкальского управлений по гид-

рометеорологии и мониторингу окружающей среды выявило значительные расхождения показателей, причины которых пока не ясны.

Оценка экологических рисков, связанных с состоянием растительного покрова (четвёртое научное направление), позволила выявить участки, отличающиеся наибольшим видовым разнообразием, предложить концепцию сети мониторинга климатически важных параметров с учётом поясности и ландшафтного разнообразия побережья горного обрамления Байкала. Определены ключевые показатели мониторинга патологий леса, отработана технология отражения средообразующих функций лесных экосистем Байкальской природной территории (поглощение углерода и продуцирование кислорода). В лабораторных условиях установлена длительность развития генерации нового для БПТ инвазионного стволового дендрофага пихты сибирской. Предложен алгоритм модели потенциального распределения биоценозов и их биопродуктивности. Разработаны система мониторинга лесных пожаров, метод идентификации гарей. Важно отметить, что эти научные исследования непременно дадут ощутимый лесохозяйственный и природоохранный эффект. Качество принятия решений в сфере охраны и защиты леса от болезней и вредителей может быть повышено с началом функционирования системы, которая должна обеспечивать автоматизированный сбор, хранение и обработку экологически значимой информации для оценки состояния и прогнозирования развития лесов, выявления тенденций как во времени, так и в пространстве.

Главный результат, полученный в рамках четвёртого научного направления, – создание пилотной сети полигонов Листвянка, Бугульдейка, Приольхонье, обеспечивающей в режиме реального времени мониторинг опасных геологических процессов в западной части центральной экологической зоны Байкальской природной



Рис. 4. Пункты комплексного мониторинга опасных геологических процессов на полигонах Приольхонье, Бугульдейка и Листвянка в центральной экологической зоне Байкальской природной территории

территории (рис. 4). Анализ результатов наблюдений позволит эффективно оценивать динамику процессов, оказывающих действенное влияние на состояние уникальной экосистемы озера Байкал, его водных ресурсов. Что немаловажно, повысится и качество прогноза экстремальных проявлений.

На полигоне Бугульдейка с применением буровых и горных работ созданы пункты постоянных измерений скорости движения земной коры, сейсмических и микросейсмических колебаний, концентрации радона в почве, температурного режима горных пород, а также периодических измерений удельного электрического сопротивления породного массива в верхней части земной коры. Аналогичный мониторинг ведётся на полигонах Приольхонье и Листвянка.

Для прогноза опасных геологических процессов эндогенной природы, разработаны модели деформации земной поверхности, принципы прогноза сильных землетрясений на основе анализа поля радона, метод мониторинга деформации горных пород на малых (первые метры) и средних (первые сотни метров) баз³ измерения напряжений, а также методика обнаружения признаков подготовки близких, умеренных и сильных землетрясений на основе детального изучения микросейсмических полей. Предложен метод оценки температурного режима горных пород исходя из анализа мониторинговых данных с учё-

³ В данном контексте базой называют расстояние от пункта измерения (прибора) до точки измерения. Например, для средних баз это расстояние от лазерного дальномера до точки, в которую направлен луч.

том динамики проявления опасных процессов в пределах центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Собраны и проанализированы гидрогеохимические данные по подземным водам районов расположения геодинамических полигонов, предложен гидрогеохимический метод оценки проникновения вод Южного Байкала в активные разломы побережья, разработаны теоретические основы метода оценки режима, химического состава и качества подземных вод в пределах изучаемой зоны.

Анализ позволил выявить новые закономерности проявления опасных геологических процессов в южном Прибайкалье, связанных с миграцией подземных вод и активизацией сейсмической активности. Обнаружен феномен распространения глубинной воды Южно-Байкальского резервуара с характерными значениями соотношений активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.95\text{--}1.99$ и концентрацией $\text{U} = 0.44\text{--}0.46$ мкг/дм³ под побережьем Байкала [9]. Выявлены меняющиеся во времени соотношения компонентов подземных вод, обусловленные проявлением деформационного эффекта Чердынцева–Чалова, химического взаимодействия воды с эвапоритами и смешения подземных вод с контрастными U-изотопными характеристиками. Выполнен комплексный анализ сейсмологических, структурно-тектонических, деформометрических, эманиционных и гидрогеохимических эффектов, предшествовавших Быстринскому землетрясению и его сопровождавших (21.09.2020 г., Mw = 5.4) [10], установлены его сейсмологические параметры, выделены эффекты, представляющие интерес для дальнейших

исследований предвестников сильных землетрясений в Прибайкалье.

Коллективом Института геохимии имени А.П. Виноградова СО РАН выделены требующие постоянного контроля химические элементы и соединения, которые составят основу базы данных “Неорганические загрязнители в стоке озера Байкал (исток реки Ангары, Иркутское водохранилище, верхняя часть Братского водохранилища)”. В неё будут внесены концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , F, P, микроэлементов (Hg, Cd, Pb, Zn, As, Br, V, Ge, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Fe, Cu, Mo, U, Th), а также физико-химические параметры воды, определяемые по сети отбора проб, оптимизированной для оценки качества и прогноза возможных изменений водных экосистем Байкальской природной территории.

Для обеспечения медико-экологического и эпидемиологического мониторинга (шестое научное направление) определены уровни воздействия химических загрязнителей, вызывающие острые, хронические и отдалённые нарушения здоровья при пребывании в очаге задымления [11]. Так, при массовых ландшафтных пожарах лесов Байкальской природной территории риски острого ингаляционного воздействия, рассчитанные по максимальным зарегистрированным концентрациям, обусловлены загрязнением приземного слоя атмосферы взвешенными веществами (коэффициент опасности – $\text{HQ}_{\text{ac}} = 11.3$), формальдегида ($\text{HQ}_{\text{ac}} = 1.4$) и оксида углерода ($\text{HQ}_{\text{ac}} = 1.2$). Суммарный долевого вклад в общетоксический индекс опасности от указанных веществ составляет 96.3%. Наибольшая вероятность негативного раздражающего эффекта при остром воздействии характерна для CO (риск – 0.999), SO_2 (0.945), взвешенных веществ (0.919), сажи (0.864). К высоким и средним уровням риска при хроническом воздействии продуктов горения хвойных лесов приводит экспозиция взвешенных веществ ($\text{HQ}_{\text{cr}} = 5.4$), формальдегида ($\text{HQ}_{\text{cr}} = 4.7$), NO_2 ($\text{HQ}_{\text{cr}} = 1.5$). Воздействие примесей в длительном режиме даже на уровне средних величин может привести к усилению патологии органов дыхания (индекс опасности – $\text{HI}_{\text{cr}} = 12.7$), сердечно-сосудистой системы ($\text{HI}_{\text{cr}} = 6.3$), повышению смертности ($\text{HI}_{\text{cr}} = 5.9$).

Также предложены методические подходы к созданию биологических моделей острой интоксикации организма дымом природных пожаров. Впервые разработанная экспериментальная модель динамического торфяного пожара позволяет анализировать в экспозиционных камерах состав газовой смеси, образующейся при термическом разложении торфа. Количественная и качественная характеристика основных компонентов дыма, включающая содержание ультрадисперсных

твёрдых частиц (PM 2.5⁴), CO, ацетальдегида, окислов азота, альдегидов, гетероциклических соединений, терпенов, производных фенолов, показала идентичность её факторам задымления при торфяных пожарах в природных условиях. Основным критерием такой идентичности служили показатели содержания в воздухе CO и PM 2.5, составившие $40.8 \pm 1.9 \text{ мг/м}^3$ для CO и $0.92 \pm 0.34 \text{ мг/м}^3$ для PM 2.5. Использование модели позволит определить индикаторы нарушений здоровья при природных пожарах в Прибайкалье.

Упомянем ещё одну разработку. Это прототип кадастра природно-очаговых инфекций, имеющих эпидемиологическое значение для населения Байкальской природной территории. Кадастр содержит спектр клещевых инфекций, включая клещевой вирусный энцефалит, иксодовый клещевой боррелиоз, клещевой риккетсиоз, клещевую возвратную лихорадку, гранулоцитарный анаплазмоз человека и моноцитарный эрлихиоз человека, а также спектр других вирусных и бактериальных инфекций: вирус гриппа птиц А, геморрагическую лихорадку с почечным синдромом, лихорадку (вирус) Западного Нила, туляремию, сибирскую язву, чуму, новую коронавирусную инфекцию (SARS-CoV-2). Все эти возбудители имеют важное эпидемиологическое значение не только для Прибайкалья, но для всей нашей страны, для мира в целом.

Подводя итог можно отметить, что разработанные в рамках проекта методы и технологии позволяют создать оригинальную распределённую сервисно-ориентированную цифровую платформу хранения, обработки больших объёмов разноформатных научных данных и знаний для поддержки процессов непрерывного мониторинга крупных природных объектов, их междисциплинарных исследований и прогнозирования возможных событий. Важнейшими составляющими устойчивого развития не только Байкальского природного региона, но и всей Сибири должен стать созданный на единой концептуальной основе цифровой мониторинг с оценкой состояния природной среды и объектов техносферы, организацией региональных систем цифрового управления антропогенными, экологическими, природными, геодинамическими, радиационными, а в более глобальном смысле – территориальными рисками.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

В статье представлены результаты, полученные в рамках выполнения проекта “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и

⁴ PM 2.5 – загрязнитель воздуха, состоящий как из твёрдых микрочастиц, так и мельчайших капель жидкостей. Размер мелкодисперсных взвешенных частиц достигает 2.5 мк.

прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории” (грант № 075-15-2020-787 Минобрнауки России на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность за предоставленные материалы институтам-партнёрам: ФИЦ информационных и вычислительных технологий, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН, Лимнологическому институту СО РАН, Институту вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институту оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Байкальскому институту природопользования СО РАН, Институту земной коры СО РАН, Институту геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Институту географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Сибирскому институту физиологии и биохимии растений СО РАН, Восточно-Сибирскому институту медико-экологических исследований СО РАН, Институту солнечно-земной физики СО РАН, Институту мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотарёв И.И. Экологические проблемы Сибирского федерального округа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2005. № 2. С. 49–50.
2. Соян Ш.Ч. Экологические проблемы сибирских регионов // Природные ресурсы, среда и общество. 2019. № 3 (3). С. 34–38.
3. Kadochnikov A.A., Yakubailik O.E. The FRC KSC SB RAS air monitoring system of Krasnoyarsk: technological tools and preliminary results // Proceedings of SPIE. 2020. V. 11560. Art. 1156053.
4. Потапов В.П., Опарин В.Н., Счастливец Е.Л. и др. Об одном подходе к построению многослойной геоинформационной системы экологической оценки горнопромышленных регионов на примере их биоразнообразия // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 4. С. 186–196.
5. Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K. et al. Digital environmental monitoring technology Baikal natural territory // 3rd Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020). CEUR Workshop Proceedings, 2020. V. 2677. P. 1–7.
6. Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Моложникова Е.В., Шуховцев М.Ю. Некоторые результаты цифрового (in situ) мониторинга загрязнения атмосферы газовыми примесями в центральной экологической зоне Южного Байкала // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 141–155.
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.141>
7. Aslamov I.A., Makarov M.M., Gnatovsky R.Yu. et al. Development and deployment of autonomous water level monitoring system at the lower and upper sections of the Slyudyanka river // Limnology and Freshwater Biology. 2020. № 6. P. 1080–1083.
8. Aslamov I.A., Makarov M.M., Gnatovsky R.Yu. et al. Observation results of hydrophysical and hydrochemical parameters in the littoral zone of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2020. № 5. P. 1073–1075.
9. Rasskazov S.V., Pyasova A.M., Chuvashova I.S. et al. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. № 3. P. 632–650.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>;
Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С. и др. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 3. С. 632–650.
<https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>
10. Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А. и др. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09.2020 г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. № 5. С. 727–743.
11. Sosedova L.M., Vokina V.A., Novikov M.A. et al. Paternal Biomass Smoke Exposure in Rats Produces Behavioral and Cognitive Alterations in the Offspring // Toxics. 2021. № 3.
<https://doi.org/10.3390/toxics9010003>