

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ “ОБЩЕСТВО–ПРИРОДА” В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА БИОСФЕРЫ

© 2023 г. Е. В. Евстафьева^а, *, Е. В. Ясенева^б, **, А. М. Богданова^с, А. С. Макарова^д,
О. А. Залата^с, С. Л. Тымченко^с, О. Б. Московчук^с, А. Е. Слюсаренко^с, И. А. Евстафьева^с,
Ю. А. Бояринцева^с, С. А. Зинченко^с

^аАкадемический научно-исследовательский институт физических методов лечения, медицинской климатологии
и реабилитации им. И.М. Сеченова, ул. Мухина, 10/3, Ялта, 298603 Россия

^бФилиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
ул. Героев Севастополя, 7, Севастополь, 299001 Россия

^сКрымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, бульвар Ленина, 5/7, Симферополь, 295006 Россия

^дРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, 125047 Россия

*e-mail: e.evstafeva@mail.ru

**e-mail: eyaseneva@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.

После доработки 27.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

В статье обосновывается необходимость биогеохимического подхода к анализу взаимодействия в системе “общество–природа” в условиях антропогенной трансформации биосферы, ключевым индикатором которого является состояние здоровья населения. Излагаются основные принципы и задачи многоуровневого медико-экологического мониторинга, который позволяет последовательно продвигаться от качественной оценки состояния здоровья населения и экологической ситуации к количественному определению степени экологического риска здоровью и региональных норм для техногенных факторов с учетом модификации их эффекта биогеохимическими условиями среды. Приводятся результаты апробации мониторинга на региональном (Республика Крым), субрегиональном (г.г. Севастополь, Симферополь) и локальном (отдельные когорты городского населения) уровнях. Ведомственные официальные данные при ограниченности их информативности для решения научных задач на региональном уровне с достаточной долей вероятности позволили выявить контрастные в плане экологического риска здоровью территории. Субрегиональные (в пределах населенных пунктов) биомониторинговые исследования на этих территориях (г.г. Севастополь и Симферополь) обнаружили пространственную гетерогенность и локусы с более высоким содержанием некоторых тяжелых металлов и других химических элементов в средах и биосубстратах (почва, растения). Когортные исследования жителей этих городов и определение содержания 29 химических элементов в организме человека и функционального состояния систем-мишеней в группах риска на основе данных корреляционного и регрессионного анализов позволили количественно оценить их физиологическую значимость, а также эффекты комплексного влияния при фоновой экспозиции.

Ключевые слова: биогеохимические основы нормирования, медико-экологический мониторинг, микроэлементы, ксенобиотики, здоровье населения, моделирование

DOI: 10.31857/S0016752523100059, EDN: GTWIHT

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные положения учения В.И. Вернадского о биосфере и ноосфере, как научном регулировании взаимодействия в системе “общество–природа”, оказались неисчерпаемой основой для развития не только теоретических представлений, но и решения насущных практических задач современности. Их актуальность

стала еще более острой в последние десятилетия в связи с глобальной антропогенной трансформацией биосферы, которая на локальном и региональном уровнях на некоторых территориях достигает критических состояний, приводящих к необратимым последствиям как для экосистем, так и для здоровья населения. Их масштабы столь значительны, что на повестке дня научного сообщества стоит вопрос о выживании Homo sapiens в

этих условиях. И первое оптимистичное восприятие названия статьи В.И. Вернадского “Начало и вечность жизни”, 100-летний юбилей выхода которой мы отмечаем, сменяется пониманием, что именно на Земле жизнь имела начало, а, следовательно, при неразумном технологическом развитии, на Земле она может быть конечной. Это как никогда ощущается в последнее время.

Что возможно сделать для того, чтобы представления В.И. Вернадского о ноосфере были реализованы? Отказаться от техногенеза не представляется возможным, но возможно попытаться определить рамки допустимой антропогенной трансформации биосферы, при соблюдении которых механизмы гомеостатического регулирования в экосистемах и организме человека будут достаточными, а риск их необратимого нарушения — минимальным.

В связи с этим при всем многообразии взаимодействия в системе “общество—природа”, многочисленных проявлениях и последствиях антропогенной трансформации биосферы для экосистем и здоровья человеческой популяции жизненно важным является умение сосредоточиться на оценке ключевых индикаторов этого взаимодействия.

На разных этапах антропогенеза это взаимодействие осуществлялось в разных формах и с разными последствиями. Менялась и приоритетность экологических факторов в отношении их значимости для выживания и оптимального существования человеческих популяций. По мере того, как развитие техногенеза увеличивало возможности культурной адаптации к условиям среды и были освоены разные климато-географические регионы, все более определяющую роль в условиях возрастающего химического загрязнения стала играть фундаментальная экологическая связь в виде биогеохимических трофических цепей. Вовлечение в них огромного количества химических элементов (ХЭ), соединений и ксенобиотиков привело к нарушению глобальных биогеохимических циклов, формированию искусственных биогеохимических провинций и, как следствие, изменению химического гомеостаза в организме человека, являющегося конечным консументом большинства из них. Повышенное поступление в организм человека токсичных в сочетании с дефицитом эссенциальных микроэлементов дало основание для заключения о масштабах этого явления и вывода о том, что “...коррекция дисбаланса макро- и микроэлементов может быть сопоставима с ролью генетических факторов в формировании здоровья” (Кудрин, Громова, 2006).

В этих условиях необходима такая методология, которая позволит с уверенностью определить рамки допустимой антропогенной нагрузки с учетом природных (биогеохимических) особен-

ностей территорий и техногенной нагрузки. В качестве инструмента для этого предлагается использовать оценку экологического риска как для экосистем, так и для здоровья. Производить ее следует посредством натуральных мониторинговых исследований, которые позволят в значительной степени учитывать комплекс природных и техногенных факторов, приоритетность и значимость которых в отношении влияния на здоровье на разных территориях существенно различается.

Целью настоящего исследования явилась разработка и апробация методологического подхода и методических приемов к осуществлению медико-экологического мониторинга разного уровня в масштабах отдельного региона.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Недостаточность гигиенического нормирования, ограниченность использования предельно допустимых концентраций (ПДК) в качестве норматива, необходимость определения экологических (экосистемных) нормативов давно обсуждаются в литературе (Башкин и др., 1993). Их критике и анализу посвящено значительное количество научных публикаций. Более того, в этом направлении имеется и значимый практический прогресс, например, в виде руководств (Шпрангер и др., 2004; Припутина, 2015), которые разрабатываются экспертными группами под эгидой Конвенции о трансграничных переносах атмосферных загрязнителей (Long Range Transboundary Air Pollution — LRTAP), и рекомендуются к использованию при оценке экологической ситуации в странах-участницах Конвенции. Эти нормативы (критические нагрузки — КН) рассчитываются с учетом природных особенностей территорий, и при неполной их объективности в силу ограниченности и (или) неопределенности некоторых из исходных данных они являются значительно более информативными по сравнению с ПДК. Этот подход по своей сути является практической реализацией биогеохимического методологического принципа теории В.И. Вернадского.

Но в любом случае при имеющемся методологическом и методическом прогрессе в оценке экологической ситуации недостаточной остается оценка конечного эффекта влияния антропогенно модифицированной среды на общественное здоровье. В то же время становится все более ясным, что негативные изменения в состоянии общественного здоровья в значительной степени обусловлены растущей техногенной нагрузкой, в связи с чем экологическая модель медицины (Дильман, 1987) на сегодняшний день считается ведущей.

Сосредоточение усилий на анализе состояния популяционного здоровья на конкретных терри-

ториях и степени его обусловленности экологической ситуацией (оценка экологического риска здоровью) позволит оценить реальный эффект влияния техногенных факторов на фоне природных (биогеохимических) условий в регионе и значительно экономизировать действия по определению степени экологического риска на конкретной территории. Кроме этого, существенная экономия затрат на мониторинговые исследования возможна будет при их выполнении прежде всего на наиболее неблагоприятных в отношении здоровья населения и экологической ситуации территориях, поскольку следует стремиться к снижению риска, но невозможно достичь его нулевого уровня.

Гуманитарная составляющая и экономическая оценка качества здоровья нашла отражение в стратегических документах государства (Основы государственной политики..., 2012). И если еще недавно это носило главным образом декларативный характер, то последние методические рекомендации (Зайцева и др., 2022) в этой сфере свидетельствуют о достаточно ясном понимании того, какой должна быть оценка воздействия на человека с биогеохимических позиций. Главным критерием качества среды и основанием для принятия решений по управлению риском является оценка экспозиции поступающих по всем возможным путям в организм человека загрязнителей и определение степени их влияния на органы и системы-мишени и приспособительные возможности организма в целом.

Последнее представляется особенно важным, если исходить из того, что экологическое нормирование должно основываться на превентивных позициях, а не на результатах состоявшегося неблагоприятного воздействия на здоровье в виде заболеваемости или смертности. Иными словами, в дополнение к имеющимся подходам использования медико-демографических показателей в оценке качества здоровья нужно ориентироваться на отслеживание предпатологических изменений, а точнее, — снижение адаптационных резервов организма, — которые будут сигнализировать о необходимости ограничения того или иного фактора на стадии, когда еще не сформированы необратимые изменения в состоянии здоровья. Обоснование предлагаемых подходов не отрицает уже практикуемые в этой научно-практической сфере, а лишь является их продолжением, позволяющим решать задачи на качественно более высоком уровне.

МЕТОДИКА

Дизайн исследования

Исходя из биогеохимических принципов экологического нормирования была разработана и апробирована в Крымском регионе схема меди-

ко-эко-физиологического мониторинга (рис. 1). В ее основу положен комплексный системный подход к решению разного уровня медико-экологических задач, что позволяет осуществлять последовательное продвижение от качественной оценки ситуации и выявления наиболее неблагоприятных в отношении экологического риска здоровью территорий к количественной оценке обусловленности здоровья действием комплекса приоритетных техногенных факторов с учетом природных особенностей территорий. В конечном итоге результатом должна явиться количественная оценка влияния на здоровье (индивидуальное и популяционное) тех или иных приоритетных на конкретных территориях загрязнителей, определение региональных нормативов, степени экологического риска здоровью и основанное на этом управление риском.

Так, региональный уровень мониторинга подразумевает сбор, обработку и анализ имеющихся ведомственных данных, позволяющих оценить экологическую ситуацию и состояние здоровья населения. В результате такого анализа оценивается пространственная неоднородность территорий, определяются среди них те, которые на основании полученных данных возможно считать территориями повышенного экологического риска.

Далее на этих территориях выполняются менее масштабные исследования субрегионального уровня, обычно в пределах населенных пунктов, при которых используются как имеющиеся данные (например, заболеваемость, но с адресной привязкой, а не обобщенные сведения), так и проводятся мониторинговые исследования по определению содержания загрязнителей в различных средах (почва, вода, воздух) и биологических субстратах (растения) в местах проживания. Результатом субрегионального мониторинга является определение локусов с неблагоприятным состоянием здоровья населения и экологической обстановкой. Благодаря количественному определению конкретных загрязнителей в разных компонентах среды возможна оценка их содержания в звеньях биогеохимических пищевых цепей и выявление наиболее значимых факторов риска на данных территориях.

Наконец, в отдельных локусах выполняются когортные исследования по определению содержания ХЭ и соединений в биосубстратах человека (биомаркеры экспозиции) и физиологические исследования по оценке функционального состояния систем-мишеней (биомаркеры эффекта). Посредством использования математических методов анализа осуществляется интеграция биомониторинговых, экологических и физиологических данных, производится количественная оценка значимости экологических факторов, определяется

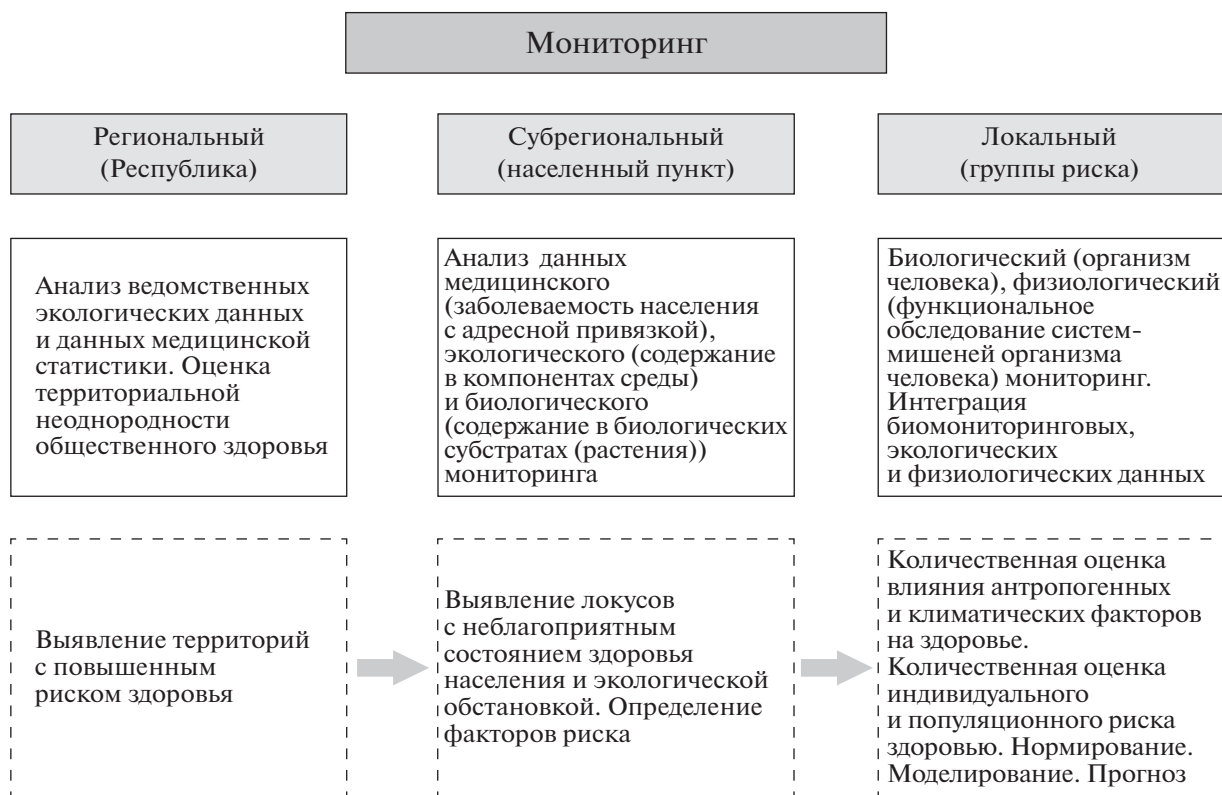


Рис. 1. Уровни и задачи медико-эко-физиологического мониторинга.

степень индивидуального и популяционного риска здоровью.

На основании установленных зависимостей и моделей осуществляется определение уровней (доз) факторов, превышение которых способно привести к уменьшению адаптационных резервов организма (предпатологические состояния, “количество здоровья”) и (или) к невозможности поддержания гомеостаза (срыв адаптации, патология, болезнь).

Региональный мониторинг. Для выполнения мониторинговых исследований на региональном уровне были собраны и проанализированы ведомственные данные Министерств Здравоохранения и Экологии и природных ресурсов Республики Крым за возможно доступный период времени. Так как в соответствии с вышеизложенным ключевым индикатором было избрано здоровье человека, на 1-м этапе анализировали временную и пространственную неоднородность данных по общей заболеваемости и заболеваемости отдельных систем за 20–42-летний период, в том числе экологически зависимыми заболеваниями за последние годы.

Поскольку интересовала прежде всего экологическая детерминанта состояния здоровья, наиболее информативной на этапе регионального мониторинга являлась обобщенная оценка и со-

поставление состояния здоровья населения и экологической ситуации. Для этого определяли индекс регионального здоровья (Тикун, 1997) и ранжировали муниципальные образования по результатам интегрального нормирования показателей состояния окружающей среды (Prokhorov, Tikunov, 2005).

Определение индекса регионального здоровья основывалось на анализе официальных данных по общей смертности населения, младенческой смертности; смертности от инфекционных и паразитарных болезней; от болезней системы кровообращения, дыхания, органов пищеварения; новообразований; от врожденных аномалий и внешних причин. При расчете индекса регионального здоровья использовали данные Федеральной службы государственной статистики за 2018 г.

Экологическая оценка территорий производилась по интегрированному нормированному показателю состояния среды, который рассчитывали: по доле проб, не соответствующих санитарно-химическим показателям; обеспеченности населения муниципальных образований Крыма доброкачественной водой (данные Роспотребнадзора за 2016–2018 гг.); средним объемом выбросов стационарных источников в атмосферу в муниципальных образованиях Республики Крым (данные Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым за 2016–2018 гг.).

Учитывая ограниченную информативность официальных данных, были выполнены собственные мониторинговые исследования с использованием традиционного гигиенического и биогеохимического подхода — уравнения масс-баланса (Шпрангер и др., 2004). Были рассчитаны критические нагрузки трех тяжелых металлов (ТМ) (свинец, кадмий, ртуть) для двух типов наиболее распространенных в Крыму экосистем — лесных и сельскохозяйственных (пашня), и окислов азота и серы — для лесных экосистем. Детальное описание работ приведено в публикациях (Евстафьева и др., 2015, 2016 и др.).

С 2009 по 2013 гг. выполнялись работы по определению превышений КН для Pb и Cd, которые в последующем были продолжены до 2020 г. включительно в рамках Программы по охране окружающей среды в Республике Крым. На этих же экспериментальных площадках, расположенных в центральном, южном, северном, восточном и западном районах Крымского полуострова определяли и сравнивали с ПДК содержание ТМ в почвах.

Помимо этого, для обобщенной оценки экологической ситуации в отношении вклада в загрязнение ТМ выполняли моделирование с использованием модели USEtox, с помощью которой оценивают техногенную миграцию химических веществ от производственных объектов, станций очистки сточных вод и пр. в окружающую среду через массовые потоки между компонентами окружающей среды. Подробное описание методики приводится в публикации (Макарова и др., 2022).

Субрегиональный мониторинг. На этом уровне мониторинга были выполнены исследования по определению ТМ в растительных объектах и почвенном покрове городской среды. Отбор проб листьев проводился по равномерной сети шагом приблизительно 1 км по всей территории города. Листья тополя пирамидального (*Populus nigra* f. *pyramidalis*) в первичной сырой массе около 100 г (20–30 листьев с одного дерева) отбирали из нижней внешней части кроны по окружности на высоте 1.5–2 м от поверхности земли с приблизительно одновозрастных деревьев с максимально возможным количеством ветвей, растущих в разных направлениях.

Отбор почвенных образцов был произведен на 69 площадках, которые находились на селитебной территории г. Севастополя (урбаноземы и культуроземы), и представляли различные ареалы функционального зонирования (рис. 2).

Химический анализ на определение ТМ в растительных образцах проводили на спектрометре “Спектроскан-МАКС-G” с использованием метода масс-спектропии в Научно-образовательном центре коллективного пользования ФИЦ ИнБЮМ “Спектрометрия и хроматогра-



Рис. 2. Схема расположения отбора проб почв на карте функционального зонирования города в г. Севастополе.

фия”, г. Севастополь. Оценка уровня загрязнения растительных объектов ТМ проводили по показателям, предложенным в результате сопряженных биогеохимических исследований окружающей среды городов с действующими источниками загрязнения (ГОСТ 17.4.4.02-84, 1984; Мажайский и др., 2003): 1) кларки концентрации (КК); 2) коэффициенты концентрации (Кк); 3) коэффициент биологического поглощения (КБП); 4) биогеохимическая активность (БХА). Общий уровень загрязнения листвы и почвы оценивали по индексу суммарной токсической нагрузки:

$$S_i = (1/n) \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\text{фон}}},$$

где C_i — содержание химических элементов в почве и растительности на исследуемом участке, $C_{\text{фон}}$ — концентрация соответствующего элемента на фоновом (в данном случае данные по Байдарской долине) участке, n — число элементов, включенных в анализ. Суммарный показатель загрязнения Z_c рассчитывали, как сумму превышений коэффициентов концентраций ХЭ, накапливающихся в аномалиях (Саеи и др., 1990) и оценивали в соответствии с градацией (Мажайский и др., 2003; Обзор загрязнения ..., 1998).

Полученные данные статистически обрабатывали, используя программу Excel; построение картографического материала было выполнено в ГИС-пакетах ArcView-3.2 и Golden Software Surfer 13.

Дополнительно субрегиональные исследования по определению 29 ХЭ в листьях тополя были проведены на территории г. Симферополя. Использовали инструментальный нейтронно-активационный анализ по методике (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) на исследовательском ядерном реак-

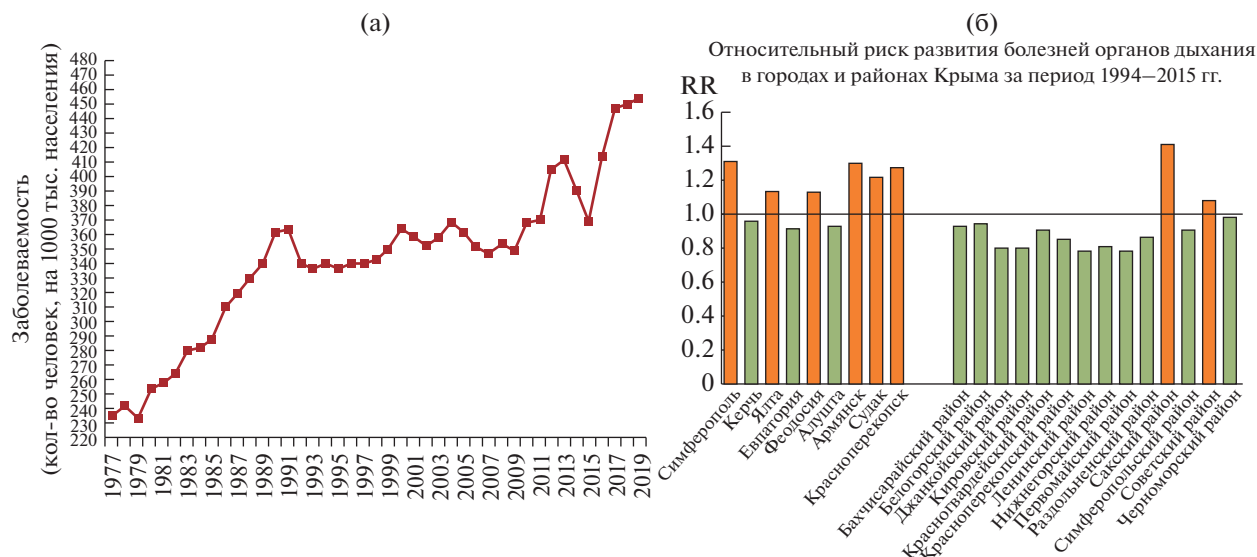


Рис. 3. Динамика онкозаболеваемости (а) и пространственная неоднородность заболеваемости дыхательной системы населения относительно среднекрымского уровня за 20-летний период (б).

торе ИРТ-Т (г. Томск, аналитик А.Ф. Судыко); определение ртути выполняли атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеemanовской коррекцией неселективного поглощения РА–915М, пиролитической приставки ПИРО–915+ (г. Томск, аналитик к.х.н. Н.А. Осипова).

Локальный мониторинг. Локальный мониторинг заключался в когортных исследованиях групп риска (дети, беременные, с хроническими заболеваниями и т.п.). При этом определяли т.н. биомаркеры экспозиции (содержание химических элементов и их соединений в биологических субстратах человека) и биомаркеры эффекта (физиологические, биохимические показатели).

Определение содержания ХЭ в биосубстратах человека проводили посредством рентген-флуоресцентной спектрофотометрии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, атомно-абсорбционной спектрофотометрии, инструментального нейтронно-активационного анализа. В качестве биосубстратов чаще всего использовали пробы волос, при обследовании некоторых когорт – венозную, пуповинную кровь, плаценту, грудное молоко. Отклонения индивидуального и группового элементного профиля волос обследуемых от нормы отмечали, ориентируясь на референсные значения содержания ХЭ в волосах (Скальный, 2003; Скальный, Рудаков, 2004; National research council ..., 2000).

Функциональное состояние систем-мишеней организма (иммунной, центральной и автономной нервной системы, сердечно-сосудистой системы) у различных групп риска проводили посредством методов иммунофлуоресцентного ана-

лиза, электроэнцефалографии с регистрацией вызванных и связанных с событием потенциалов, вариационной пульсометрии, реографии, психологического тестирования.

С целью интеграции экологических и физиологических данных и определения значимости уровней ХЭ в организме для функционального состояния систем использовали непараметрический корреляционный анализ по Спирмену и регрессионный анализ с использованием программного пакета Statistica, по результатам которых рассчитывали физиологическую значимость ("тропность") ХЭ, коэффициенты элементного дисбаланса и детерминации функционального состояния систем элементным дисбалансом (Евстафьева и др., 2016, 2016а).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Региональный мониторинг

Общая заболеваемость и заболеваемость органов и систем по данным обращаемости в лечебные учреждения для большинства нозологий за исследуемые периоды времени обнаружили постепенный рост. Особого внимания заслуживают экологически зависимые заболевания, например, новообразования, в том числе злокачественные, врожденные аномалии, заболевания дыхательной системы, нейродегенеративные заболевания и ряд других. При этом, сходная динамика большинства нозологий сочеталась с определенной пространственной гетерогенностью (рис. 3).

Выявление более выраженных неблагоприятных тенденций в изменении здоровья населения на некоторых территориях дает основание для поиска

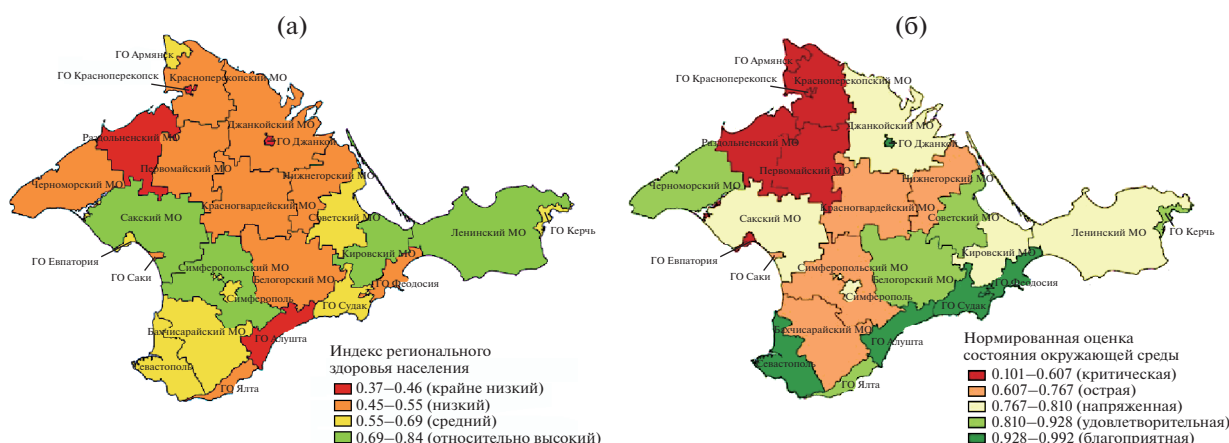


Рис. 4. Ранжирование муниципальных образований Республики Крым по интегральному нормированному показателю оценки здоровья населения (а) и окружающей среды (б) за 2016–2018 гг.

возможной роли экологической ситуации. Визуальное сопоставление обобщенных оценок административных районов полуострова обнаружило как частичное их совпадение, так и существенные отличия (рис. 4). Это ожидаемо, поскольку исходные официальные данные являются недостаточными и не исчерпывающими для объективной оценки реальной ситуации. Кроме того, экологическая детерминанта здоровья может быть действительно значимой в разной степени на разных территориях. На некоторых из них большую роль могут играть социальные (например, вопросы организации здравоохранения) и другие факторы. Наконец, если оценивается влияние экологической (биогеохимической) составляющей, дифференциальной территориальной единицей должен являться не административный район. Тем не менее, определение ранговой корреляции по Спирмену между интегральными показателями экологического состояния территорий и здоровья населения выявило статистически значимую связь ($r_s = 0.642$; $p < 0.05$). Таким образом, внутрирегиональное различие состояния здоровья населения в достаточной мере соответствовало пространственной дифференциации состояния окружающей среды, основанной на указанных выше характеристиках ее компонентов (атмосферного воздуха, почвы, воды).

При всей приблизительности оценок в результате выполнения такого интегрирования имеющих официальных данных вполне реально определить в первом приближении территории, которые могут действительно оказаться территориями повышенного экологического риска для здоровья населения.

Для более объективной оценки экологической ситуации на этом уровне мониторинга были выполнены собственные мониторинговые исследования. Сопоставление результатов определения

нагрузки ТМ на почву гигиеническим (превышения ПДК) и экосистемным (превышения КН) подходами показало и сходство, и существенные различия в оценках (рис. 5), которые, очевидно, свидетельствуют о меньшей информативности традиционных гигиенических подходов, не учитывающих на каком природном фоне осуществляется техногенное воздействие. В то же время к оценке экологической ситуации по превышениям экосистемных нормативов также есть вопросы, которые нуждаются в доработке и осмыслении. Так, в Крыму имеет место высокая вариативность количества выпадающих осадков, и в зависимости от этого результаты определения превышений КН в разные годы могут отличаться на порядок.

Результаты моделирования, основанного на официальных данных, на данном этапе также противоречили в некоторых случаях данным натурных исследований. Например, вклад в атмосферное загрязнение в г. Алушта для свинца был минимален, однако мониторинговые исследования свидетельствовали об обратном, причем при оценке как отечественными, так и международными подходами (рис. 6).

Таким образом, несмотря на сравнительно благополучную экологическую характеристику Крымского региона в отношении природных условий, что, собственно, и дает основание для позиционирования полуострова как курортно-рекреационной территории, тенденции в изменении состояния здоровья свидетельствуют, что и для этого региона оценка экологического риска здоровью может считаться актуальной.

Субрегиональный мониторинг позволяет перейти к более детальным количественным оценкам территорий с биогеохимических позиций, а именно: оценить содержание загрязнителя (ТМ) в почве, растении и организме человека, — прежде всего, на

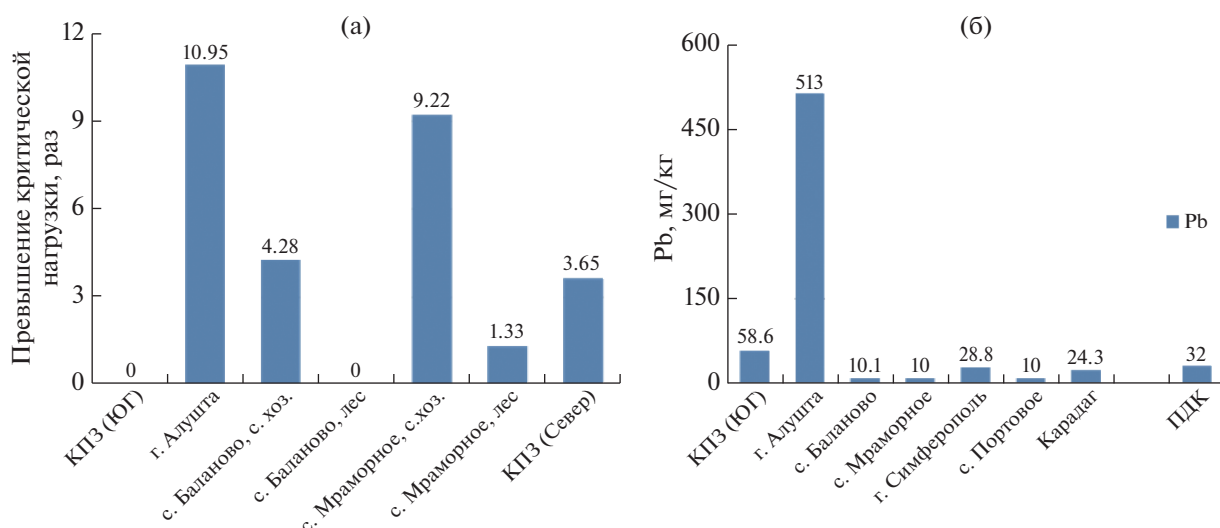


Рис. 5. Превышения критических нагрузок (а) и содержание свинца в почве (б) в 2017 г.
Примечание: КПЗ (ЮГ) – южная территория Крымского природного заповедника.

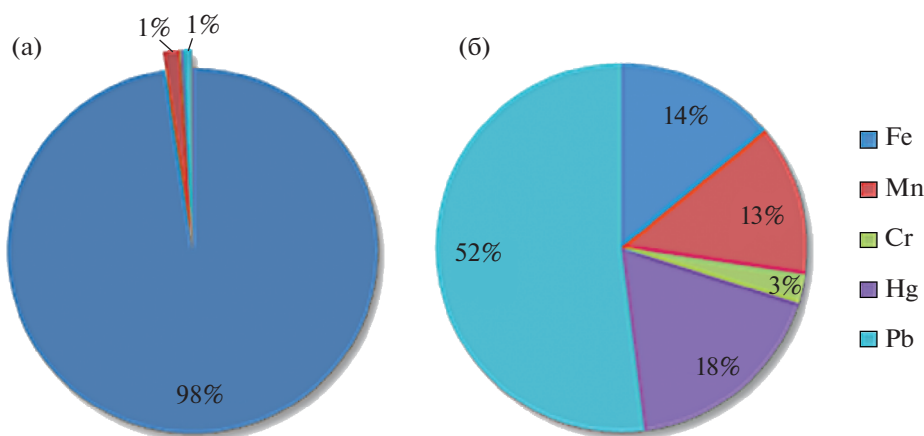


Рис. 6. Вклад тяжелых металлов в загрязнение атмосферы в г.г. Алуште (а) и Армянске (б).

городских территориях, которые на первом, региональном уровне, мониторинга в большинстве случаев обнаружили более выраженные негативные тенденции по сравнению с сельскохозяйственными территориями Крымского полуострова.

Проведенное исследование показало в целом незначительное накопление ТМ относительно фоновых уровней на территории города Севастополя. Однако, имела место достаточно высокая вариабельность содержания ТМ на разных участках городской территории, особенно для Cu, Pb, Zn и As, максимальные значения которых в несколько раз были выше средних по городу (рис. 7). Такая закономерность может свидетельствовать о наличии локальных источников загрязнения определенным металлом.

Определение ХЭ в листьях тополя также позволяет говорить о благополучной в целом, однако, весьма неоднородной ситуации. При этом не отмечаются высокие уровни такого токсичного металла как Pb, но обращают на себя внимание As, Cu и Sr, для которых выявлено более высокое содержание на отдельных территориях города. Корреляционный анализ содержания ТМ в почве и листьях для 12-ти из них выявил статистически значимую связь средней силы ($r_s = 0.64$), что дает основание предполагать его обусловленность поступлением из почвы, и в меньшей степени – поглощением из атмосферы.

В г. Симферополе выполнены исследования по определению содержания 29 ХЭ, включая редкоземельные, в листьях тополя и организме человека. На основании полученных данных были

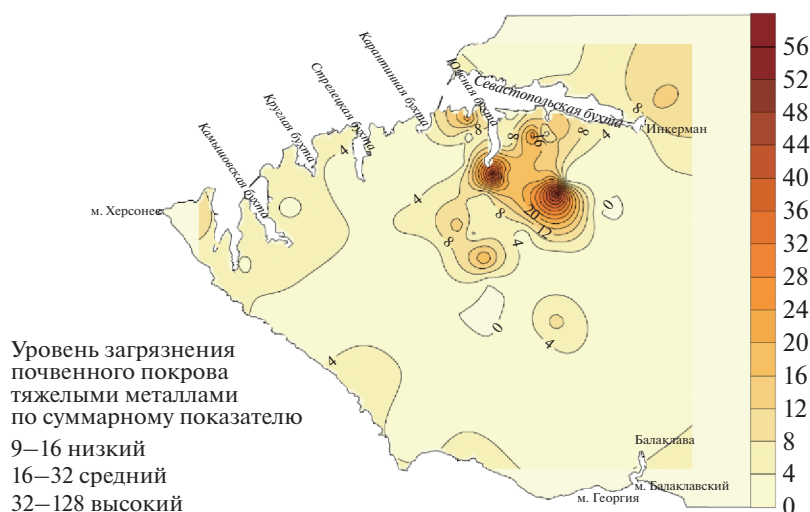


Рис. 7. Загрязнение почвенного покрова г. Севастополя тяжелыми металлами по суммарному показателю.

рассчитаны коэффициенты концентрации элементов, что позволило построить следующие геохимические ассоциативные ряды их содержания.

В золе листьев тополя геохимический ряд был следующим: $\text{Br}_{2.9} > \text{Co}_{1.8} > \text{Na}_{1.7} > \text{Sr}_{1.3} > \text{U} = \text{Rb}_{1.2} > > \text{Hg} = \text{As}_{1.1} > \text{Hf} = \text{Zn} = \text{Ag} = \text{Th} = \text{Ca}_{1.0} > \text{Cs}_{0.9} > > \text{Ba} = \text{Sb} = \text{Sc} = \text{Fe}_{0.8} > \text{Ta} = \text{Tb} = \text{Au} = \text{Lu}_{0.6} > \text{Ce} = = \text{Sm} = \text{Eu}_{0.5} > \text{La}_{0.4} > \text{Nd} = \text{Yb}_{0.3} > \text{Cr}_{0.2}$.

При этом территориальная неоднородность распределения ХЭ в листьях тополя обнаружена как внутри города, так и в сравнении с данными по другим городам России, в частности, для Br, Co, Na, Sr, U, Rb, Hg, As (Рихванов, 2015; Юсупов и др., 2018; Yusupov et al., 2020). Она также имела

место и по отношению к интегральным характеристикам: аддитивному геохимическому показателю (рис. 8) и коэффициенту Шоу (рис. 9).

Содержание значительной части определяемых в волосах жителей ХЭ соответствовало референсным значениям. В результате расчета Кк и сравнении с данными по содержанию ХЭ в волосах практически здоровых городских жителей Краснодарского края (Афтанас и др., 2012) был построен следующий геохимический ряд для жителей г. Симферополя: $\text{Co}_{0.9} > \text{Fe} = \text{As}_{1.5} > \text{Na}_{1.1} > > \text{Zn}_{0.8} > \text{Ca}_{0.7} > \text{Cr}_{0.5} > \text{Hg}_{0.3}$. Также в результате сравнения полученных данных с содержанием элементов в волосах жителей другого региона



Рис. 8. Значения аддитивного геохимического показателя A_{gi} в пробах листьев тополя г. Симферополя.

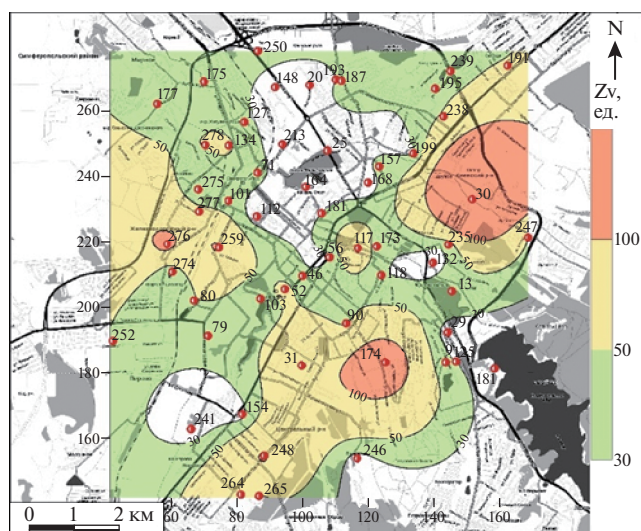


Рис. 9. Значения коэффициентов биогеохимической трансформации Z_v в пробах листьев тополя г. Симферополя.

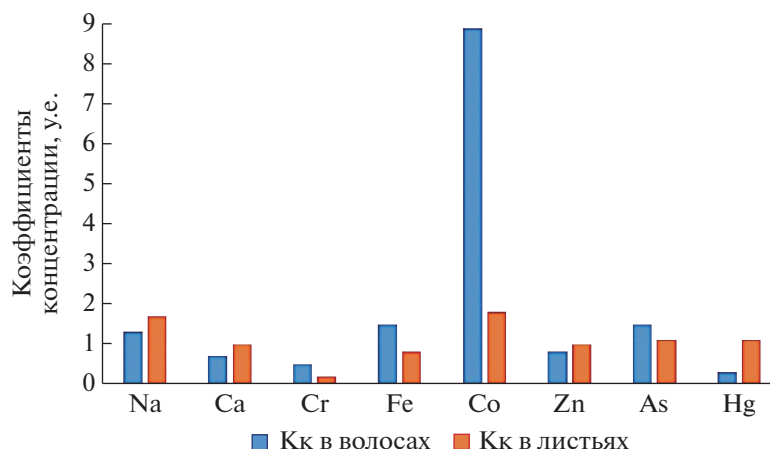


Рис. 10. Коэффициенты концентраций (Кк) ряда химических элементов в волосах жителей и золе листьев тополя на территории г. Симферополя.

Крымского полуострова (Радилов и др., 2020), – г. Армянска, – получен следующий геохимический ряд: $Hg_{8.8} > Co_{7.5} > Ag_{2.0} > As_{1.5} > Fe_{1.4} > Zn_{1.1} > Na_{1.1} > Cr_{0.8} > Ca_{0.5} > Sr_{0.4}$. Их сравнение дает основание говорить об определенной специфике элементного статуса жителей г. Симферополя.

Наиболее выраженной отличительной особенностью элементного профиля симферопольцев явилось более высокое содержание Br и Ba, севастопольцев – Al.

Сопоставление геохимических рядов ХЭ в листьях тополя и волосах жителей демонстрирует избыточное ($K_k > 1$) содержание в обоих биосубстратах Na, Fe, As и Co, в то время как в отношении других элементов этого не наблюдали (рис. 10).

Локальный мониторинг. Характер выявленных на системном уровне корреляционных связей между содержанием химических элементов и функциональными показателями состояния разных систем организма в фоновых условиях окружающей среды в целом согласовывался с известной и описанной в литературе их биологической ролью как на системном, так и на клеточном уровнях, но чаще при действии в более высоких дозах (профессиональном контакте) или в эксперименте. Следовательно, их физиологическая значимость даже в количествах в пределах существующей нормы не должна оставаться незамеченной, поскольку в случае сочетанного влияния на организм может иметь место аддитивный или даже синергический эффект, а суммирование физиологических эффектов может привести к значимому негативному влиянию и превысить приспособительные резервы организма.

В любом случае необходимы обобщающие оценки физиологической значимости этих отклонений, и не только в отношении отдельных элементов, но и в целом элементного дисбаланса.

Иными словами, важна интегральная оценка элементного статуса организма и его влияния на функциональное состояние систем. Именно это позволит установить степень обусловленности функционального состояния систем-мишеней присутствующим в организме уровнем микроэлементов. Сводные на данном этапе результаты ее определения для разных систем организма приведены в табл. 1.

Как следует из данных таблицы, “чувствительность” систем организма к уровню ХЭ отличается, то есть “тропность” одних и тех же элементов различна по отношению к разным системам организма. Более того, они могут быть более или менее значимы при определенных функциональных и патологических состояниях. Например, некоторые элементы более важны для протекания базовых нервных процессов, в то время как уровень других в большей степени сказывается на когнитивных функциях или состоянии иммунной, сердечно-сосудистой систем.

Так, у здоровых родильниц наиболее значимым для функционального состояния иммунной системы ожидаемо оказался Zn, в то время как у родильниц с антенатальной гибелью плода большим иммуностропным действием обладал Mo. В то же время корреляционный анализ содержания элементов в плаценте и иммунных показателей крови матерей показал иную “тропность” существенно большего числа элементов, среди которых были и токсичные, что требует отдельного рассмотрения. Разные ХЭ обнаруживали свое влияние и в случае с отличающимися объемами двигательной активности, а также в разные возрастные периоды. Более детально результаты мониторинговых исследований изложены в публикациях соавторов статьи.

Таблица 1. Физиологическая значимость (“тропность”) химических элементов для разных систем организма (в баллах)

<i>Нейротропность</i> , оцениваемая по спектральной мощности тета-ритма электроэнцефалограммы	
Здоровые подростки. Результаты, зарегистрированные при проведении функциональных проб (глаза закрыты, открыты, арифметическая задача)	Волосы: As(54) > Se(33) > Cr(29) > Sr(28) > Cd, Ni(26) > Pb(25) > Co(15) > Hg(13) > Ca, Zn, Cu(8) > Fe(4) > Rb(3)
	Волосы: Pb(52) > As(50) > Ni(47) > Zn(46) > Ca(39) > Cu(38) > Sr(32) > Se(23) > Fe(21) > Cr(19) > Rb(13) > Br(9) > Cl(6)
	Волосы: Hg(50) > Zn(35) > As(24) > Cl(23) > Pb(21), Ni(4) > Mn, K, Co(3)
Суммарный результат	As(128) > Pb(98) > Zn(89) > Ni(73) > Hg(63) > Sr(60) > Se(56) > Cr(48) > Ca(47) > Cu(44) > Cl(29) > Cd(26) > Fe(25) > Co(18) > Rb(16) > Br(9)
<i>Нейротропность</i> , оцениваемая по спектральной мощности альфа-ритма электроэнцефалограммы	
Здоровые юноши и девушки 18–20 лет	Волосы: Ag(45) > Au(31) > Hg(45) > Rb(20) > Ba(17) > Sb(13) > Na, Zn, Fe(12) > Ca, > Cs(8) > Br(6) > As(4)
	<i>Редкоземельные элементы</i> (юноши) Волосы: Ce(44) > Lu(33) > La(24) > Ta(23) > Nd(12) > Hf(4).
Дети с задержкой психического развития	Волосы: Pb(43) > Ni(23) > Mn(15) > Ca(7) > Sr(3)
<i>Иммунотропность</i>	
Родильницы с благополучно завершённой беременностью	Венозная кровь: Zn(37) > Cu(20) > Mn(17) > Ni(16) > Mg(14) > Al(12) > Pb, Cd(8) > Fe(4)
Родильницы с антенатальной гибелью плода	Венозная кровь: Mo(58) > Mn(8) > Al, Ni(3) > Fe(2); Плацента: Cu(32) > Pb(30) > Cd(25) > Ni(24) > Zn(16) > Al(12) > Mo(3).
Здоровые подростки	Волосы: Se, Mo(21) > V, Ba, Sb(17) > Ni(13) > As(11) > Ag(10) > Fe, Pb(9) > Cu(5)
Дети с задержкой психического развития	Волосы: Zn(28) > Fe, Pb(8) > Cu(6) > Co, Ni, Ca(4) > As, Mn, Mo, Cr(3)
<i>Вегетотропность</i>	
Подростки-спортсмены	Волосы: Sr(94) > Bi(89) > Ca(42) > S(39) > Ti(37) > Cu(12) > Mn, Fe(11) > > Co(7) > K, Br(6) > V, Sn(5)
Здоровые юноши и девушки 18–20 лет	Волосы: Sb(38) > La(30) > U(21) > Rb(17) > Au(6) > As, Sc, Eu(8) > Hg(4) > Ce(2)
<i>Кардиоваскулотропность</i>	
Подростки- спортсмены	Волосы: Mn(56) > Ti(40) > Pb(28) > Cl, Zr(16) > Ni(14) > As(12) > Ca, Fe(9) > > Zn(7) > S(6) > Cu, Se, Rb(3)
Юноши-спортсмены	Волосы: Zr(8) > Mo(5) > Fe(4) > Zn, Rb, Mn, Ca(3) > Pb, Cu, Cd(2) > > As, Se, Sn, Ni(1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация биогеохимического подхода к проведению мониторинговых исследований разного уровня на примере Крымского региона на данном этапе представляет собой не законченное исследование, а лишь совокупность решения отдельных задач, которые, однако, имеют не фраг-

ментарный, а системный характер. Задача данного этапа заключалась в апробации предлагаемого подхода и методик, оценке их информативности и перспектив использования. Это позволило получить результаты, свидетельствующие о перспективности движения в направлении исследований по оценке экологического риска здоровью как важнейшего ключевого индикатора взаимо-

действия в системе “общество—природа”. Однако достижение конечной цели в виде количественной оценки техногенного влияния на здоровье человека на конкретных территориях с определенными биогеохимическими условиями и приоритетными на данной территории антропогенными факторами возможно при полномасштабном проведении всех звеньев мониторинга на всех его уровнях. Именно в этом случае будет возможным определить пределы допустимого комплексного воздействия антропогенных факторов на экосистемы и здоровье человека с учетом природных условий на конкретных территориях и, в соответствии с этим, обосновывать управленческие решения по планированию хозяйственного развития регионов.

ВЫВОДЫ

1. Использование биогеохимического подхода на базе многоуровневого медико-эко-физиологического мониторинга в масштабах Крымского полуострова продемонстрировало его перспективность для оценки взаимодействия в системе “общество—природа”, максимально приближенной к реальной ситуации.

2. Ведомственные официальные данные при ограниченности их информативности для решения научных задач позволили на первом этапе исследований с достаточной долей вероятности выявить контрастные в плане экологического риска здоровью территории Крымского полуострова.

3. Субрегиональные биомониторинговые исследования обнаружили пространственную гетерогенность в пределах населенных пунктов (г.г. Севастополь, Симферополь) и локусы с более высоким содержанием некоторых тяжелых металлов и других химических элементов в средах (почва, растения).

4. Когортные исследования городских жителей по определению содержания 29 химических элементов в организме человека и исследованию функционального состояния систем-мишеней в группах риска позволили количественно оценить их разную физиологическую значимость при региональных уровнях фоновой экспозиции в крымских городах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Коллектив авторов выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю международной научной конференции “Современное развитие биогеохимических идей В.И. Вернадского”, рецензентам и редакции журнала “Геохимия” за анализ представленных материалов и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афтанас Л.И., Березкина Е.С., Бонитенко Е.Ю., Бурцева Т.И., Вареник В.И., Грабеклис А.Р., Демидов В.А., Киселев М.Ф., Николаев В.А., Скальный А.В., Скальная М.Г. (2012) Элементный статус населения России. Ч. 3. Элементный статус населения Северо-Западного, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов. Под ред. А.В. Скального, М.Ф. Киселева. СПб.: Медкнига “Элби-СПб”, 448 с.
- Башкин В.Н., Евстафьева Е.В., Снакин В.В., Алябина И.О., Антипов А.В., Бражникова О.И., Воробьев В.В., Воробьева И.Б., Галиулин Р.В., Дубинина С.С., Ермаков В.В., Иванов Ю.Г., Козлов М.Я., Кочуров Б.И., Кудеярова А.Ю., Кузовникова Т.А., Кречетов П.П., Макаров С.В., Мамитко А.В., Мартынов А.В., Мельченко В.Е., Миркин Б.М., Орлинский Д.Б., Припутина И.В., Романова Ю.К., Семенов Ю.М., Семенова Л.Н., Сигарева Л.Е., Сорокикова Н.В., Степичев А.В., Хазиахметов Р.М., Хазиев Ф.Х., Чернегова Л.Г. (1993) Биогеохимические основы экологического нормирования. Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие “Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр “Наука”, 304 с.
- ГОСТ 17.4.4.02-84 (1984) Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки почв для химического, бактериологического и гельминтологического анализа. Москва: Изд-во стандартов, 14 с.
- Дильман В.М. (1987) Четыре модели медицины. Л.: Медицина, 288 с.
- Евстафьева Е.В., Залата О.А., Евстафьева И.А. (2016) Способ оценки влияния биоэлементов на функциональное состояние центральной нервной системы. Патент на полезную модель № 164769 Гос. Реестр полезных моделей РФ 26.08.2016 г.
- Евстафьева Е.В., Залата О.А., Евстафьева И.А., Щёголева М.Г. (2016) Способ оценки влияния элементного дисбаланса на функциональные расстройства нервной системы. Патент на полезную модель № 164768 Гос. Реестр полезных моделей РФ 26.08.2016 г.
- Евстафьева Е.В., Нараев Г.П., Сологуб Н.А., Карпенко С.А. (2015) Подходы к оценке риска от действия тяжелых металлов на наземные экосистемы на территории Республики Крым. *Проблемы анализа риска*. 12(5), 6-15.
- Евстафьева Е.В., Нараев Г.П., Сологуб Н.А., Карпенко С.А., Белалов В.В., Богданова А.М., Тымченко С.Л., Евстафьева И.А. (2016) Оценка экологического риска здоровью населения Республики Крым как основа экологической безопасности в регионе. *Проблемы анализа риска*. 13(3), 8-25.
- Зайцева Н.В., Май И.В., Алексеев В.Б., Клейн С.В., Землянова М.А., Кирьянов Д.А., Каматдинов М.Р., Андришунас А.М., Максимова Е.В., Слюсарь Н.Н., Савочкина А.А. (2022) Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Методические рекомендации МР 2.1.10.0273-22. ФБУН “Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения”. Москва, 65 с.
- Кудрин А.В., Громова О.А. (2006) Микроэлементы в неврологии. М.: ГЭОТАР-Медиа, 304 с.

- Мажайский Ю.А., Торбатов С.А., Дубенок Н.Н. (2003) Агроэкология техногенно загрязненных ландшафтов. Смоленск, 384 с.
- Макарова А.С., Станкова А.И., Евстафьева Е.В., Евстафьева И.А. (2022) Моделирование ртутной нагрузки на экосистемы разных территорий Крымского полуострова с использованием модели USEtox. *Экосистемы*. **29**, 80-89.
- Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 г., утв. Президентом РФ от 30 апреля 2012 г., п.13.
- Припутина И.В. (2015) Методология критических нагрузок и ее развитие в связи с конвенцией о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. **26**(2), 80-96.
- Радилов А.С. Комбарова М.Ю., Павлова А.А., Горбунов А.Ю., Гуляев Д.В., Карманов Е.Ю. (2020) Содержание химических элементов в волосах населения, проживающего в г. Армянск (Республика Крым) в период чрезвычайной экологической ситуации. *Медицина экстремальных ситуаций*. **22**(1), 49-60.
- Рихванов Л.П., Юсупов Л.П., Барановская Н.В., Ялалтдинова А.Р. (2015) Элементный состав ливы тополя как биогеохимический индикатор промышленной специализации урбасистем. *Экология и промышленность России*. **45**, 58-63.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. (1990) Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 335 с.
- Обзор загрязнения окружающей природной среды в Российской Федерации за 1997 г. (1998) Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М., 218 с.
- Скальный А.В. (2003) Референтные значения концентрации химических элементов в волосах, полученных методом ИСП-АЭС (АНО ЦБМ). *Микроэлементы в медицине*. **4**(1), 55-56.
- Скальный А.В., Рудаков И.А. (2004) Биоэлементы в медицине. М.: ОНИКС 21 век. Мир, 272 с.
- Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций) (1997) М.; Смоленск: Изд-во СГУ, 367 с.
- Шпрангер Т., Смит Р., Фаулер Д., Миллз Д., Пош М., Шютце Г. (2004) Руководство по методологиям и критериям моделирования и картирования критических нагрузок и уровней, влияния атмосферных загрязнений, а также рисков и трендов: Конвенция ЭКЕ ООН по трансграничному загрязнению воздуха на большие расстояния. 307 с.
- Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Робертус Ю.В., Ляпина Е.Е., Турсуналиева Е.М., Барановская Н.В., Осипова Н.А. (2018) Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока. *Экология и промышленность России*. **22**(12), 56-62.
- National research council committee on the toxicological effects of methylmercury (2000) Toxicological effects of methylmercury. Washington (DC), National Academy of Sciences, 344 p.
- Prokhorov B.B., Tikunov V.S. (2005) Public health in the Russian regions. *Geography and Natural Resources*. **2**, 26-33.
- Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Y.V., Radomskaaya V.I., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. (2020) Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **27**, 27111-27123.