

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНДЕМИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

© 2023 г. Е. М. Коробова^а, *, В. С. Баранчук^а, **, Л. И. Колмыкова^а, ***

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: korobova@geokhi.ru

**e-mail: baranhcukov@gmail.com

***e-mail: kmila9999@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 03.05.2023 г.

Принята к публикации 05.05.2023 г.

На протяжении миллионов лет своей геологической истории (фанерозоя) коэволюция всех живых организмов осуществлялась в условиях жесточайшей конкуренции за ресурсы и возможности максимального воспроизводства, что в условиях геохимической неоднородности первичной (дочетвертичной) биосферы приводило к формированию саморегулируемой системы экологических ниш, в которой все местные биоценозы и соответствующие им виды животных и растений были в максимальной степени адаптированы к параметрам среды обитания. Однако, с появлением разума ситуация коренным образом изменилась. Человек стал доминирующим видом и начал сознательное освоение новых, в том числе геохимически неблагоприятных, территорий, что и явилось причиной формирования зон устойчивых эндемических заболеваний. Исходя из этой предпосылки, для всех существующих видов должны существовать территории с физиологически оптимальными условиями обитания, то есть те, при которых данный вид сформировался в его современном виде. Из этого следует, что, имея возможность зафиксировать геохимические параметры ненарушенной биосферы, можно получить характеристики, соответствующие экологически идеальным для местных видов животных и растений. В теоретическом плане это позволило выдвинуть гипотезу о том, что, фиксируя разницу между наблюдаемой и идеальной геохимической обстановкой, можно строить карты риска возникновения заболеваний геохимической природы, в том числе и на территориях, подвергшихся техногенному загрязнению. В статье изложена методика и приведены примеры построения таких карт. Полученные результаты могут иметь важное практическое значение при организации системы санэпидемслужбы, при решении проблем ликвидации последствий техногенных загрязнений и проведении профилактических мероприятий по минимизации эндемической заболеваемости.

Ключевые слова: биогеохимия, геохимическая экология, эколого-геохимические исследования, эндемические заболевания, здоровье человека

DOI: 10.31857/S0016752523100060, **EDN:** NLACVQ

ВВЕДЕНИЕ

Согласно основным положениям биогеохимии, химическое строение биосферы на каждом этапе представляет собой результат эволюционного взаимодействия совокупности живых организмов с геохимической средой своего обитания. При этом и человек, как и любой сформированный в биосфере вид, по образному выражению В.И. Вернадского, ни на секунду не может быть свободен от среды своего обитания. Опираясь на идеи М.В. Ломоносова (Вернадский, 1901, 1911) и своего учителя В.В. Докучаева (Докучаев, 1899) и других ученых, В.И. Вернадский обозначил пути изучения химического строения биосферы через выход на количественную оценку взаимодействия организмов со средой обитания путем об-

мена химическими элементами. Он писал, что “Подходя геохимически и биогеохимически к изучению геологических явлений, мы охватываем всю окружающую нас природу в одном и том же атомном аспекте. Это отличает XX век от прошлых веков” (Вернадский, 1980). Такой подход к изучению обмена веществом между живой и косной материей позволяет изучать особенности биогенной миграции в пространстве и времени на уровне отдельных химических элементов и соединений, от чего зависит качество и продолжительность жизни любого организма, популяции и биоценоза. Именно поэтому практически все эколого-геохимические проблемы могут иметь кондиционное решение только на основе теории и методологии биогеохимии.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ИХ АНАЛИЗ

Из истории развития экологического направления в биогеохимии

Теоретические основы были заложены В.И. Вернадским в его фундаментальном труде “Биосфера” (Вернадский, 1926). Рассмотрение живого вещества как общей совокупности живых организмов позволило ему в планетарном аспекте подойти к изучению феномена жизни. По мнению Владимира Ивановича, фундаментальная проблема биогеохимии сводится к познанию закономерностей химического взаимодействия живых организмов со средой своего обитания, а основная задача состоит в выявлении количественных параметров воздействия живых организмов на процессы рассеяния и концентрирования элементов в биосфере.

Целенаправленное экспериментальное изучение геохимической роли живого вещества было начато под руководством В.И. Вернадского в 1918 г. и продолжено в организованных им сначала Отделе живого вещества (ОЖВ) при Комиссии по изучению естественных производительных сил (КЕПС, 1926 г.), а затем Биогеохимической лаборатории, заменившей ОЖВ в 1928 г. В довоенный период в лаборатории исследовали содержание в организмах и других компонентах биосферы I, Br, F, Ca, P, Sr, Ni, Co, Mo, Pb, при этом почва рассматривалась как биокосное тело, источник химических элементов и продукт взаимодействия живого вещества со средой обитания.

Собственно экологический подход в биогеохимическом исследовании пространственной структуры биосферы был впервые четко сформулирован учеником, соратником и последователем В.И. Вернадского А.П. Виноградовым применительно к биогеохимическим провинциям и связанными с ними биогеохимическими эндемизмами — заболеваниями, обусловленными недостатком либо избытком в почвах, воде и воздухе определенных химических элементов (Виноградов, 1938).

В дальнейшем эти работы были расширены под руководством В.В. Ковальского, приглашенного А.П. Виноградовым в 1954 году в Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ АН СССР) и возглавившего лабораторию биогеохимии. На стыке биогеохимии и экологии В.В. Ковальский создал новую науку — геохимическую экологию — и среди ее проблем выделил познание закономерностей эколого-геохимической неоднородности биосферы, рассматриваемой в качестве среды жизни. В ходе решения этой задачи он обратил внимание на разную потребность организмов в химических элементах и определил для территории СССР физиологические нормативы элементов. На большом фактическом материале он определил пороговые концентрации ряда биологически значимых химиче-

ских элементов, содержащихся в почвах и кормах (Ковальский, 1974; Ковальский, Андрианова, 1970; Ковальский и др., 1971). Эти цифры определяли диапазон, в пределах которого исследованные сельскохозяйственные животные были способны поддерживать состояние гомеостаза. Соответственно, ниже и выше этих значений регуляторные возможности нарушались, что гарантированно приводило к патологическим изменениям, трактуемым как ответные реакции организмов на недостаток/избыток биологически значимых химических элементов. При этом было показано, что явные нарушения регуляторных механизмов часто наблюдаются только у 5–20% особей обследованных популяций. В.В. Ковальский также разработал и общие принципы эколого-геохимического картографирования, на базе которых в 1957 г. создал первый вариант карты биогеохимического районирования СССР с учетом выявленных негативных биологических реакций, наблюдаемых у растений, животных и человека. С появлением новых данных эта карта неоднократно уточнялась, однако, после ухода из жизни ее автора в 1984 г. больше не обновлялась. В то же время медико-географические карты СССР и России, опубликованные другими авторами, в большинстве случаев сводились в основном к иллюстрации распространенности инфекционных заболеваний, а эколого- и медико-геохимические карты — к оценкам уровня техногенного загрязнения территории относительно глобального или регионального геохимического фона, а также санитарно-гигиенических нормативов или отклонения от среднего содержания в тканях и жидкостях организма по отдельным элементам или соединениям (Сает и др., 1990; Kist et al., 1998; Малхазова, 2001; Горбачев и др., 2007; Ермаков и др., 2018; Evstafeva et al., 2019; Рихванов и др., 2021 и др.). Среди зарубежных публикаций к наиболее полным картографическим материалам эколого-геохимической направленности можно отнести атлас распространенности эндемических заболеваний населения Китая (Кашина-Бека, эндемического зоба, флюороза и др.) и эколого-геохимический атлас Китая (с картами содержания химических элементов в водах и донных отложениях, частично — в почве, и др.) (Xiang, 1989; Li, Wu, 1999), а также почвенно-геохимические карты Европы, Италии, Испании, Великобритании, Бразилии и др., на которых обычно отображались экологически значимые геохимические аномалии природного и антропогенного генезиса (Davies et al., 2005; Thornton, Webb, 1979; Dissanayake, Chandrajith, 2009; Thornton, 2010; da Silva et al., 2010; Reimann, Caritat, 2012; Watts et al., 2020; Bineshpour et al., 2021).

О возникновении биогеохимических эндемий

Заболевания человека и животных, вызываемые проживанием в неблагоприятных геохимических условиях, известны с давних времен (эндемический зоб, кариес, флюороз, цинга и др.). Однако научное объяснение их возникновения и разработка методов лечения были осуществлены сравнительно недавно, по мере развития средств диагностики и массового химического анализа. Зоны распространения таких заболеваний охватывали миллионы квадратных километров и привели к гибели миллионов человек в разных регионах мира. Непосредственной причиной в данном случае является несоответствие местных геохимических условий физиологическим потребностям организмов, при этом выяснение причин возникновения самого этого несоответствия представляет собой важную научную проблему.

Поставив этот вопрос, следует обратить внимание на то, что все эндемические заболевания были зафиксированы у людей и интродуцированных ими животных и растений, в то время как в экспериментах с почвенными микроорганизмами, растениями и животными, аборигенные виды такими заболеваниями не страдали.

Опираясь на теоретические положения В.И. Вернадского о том, что не только среда определяет состав живого вещества, но и само живое вещество глубоко преобразует геохимический состав среды, А.П. Виноградов выделял палеобиогеохимические провинции, образующиеся в ходе длительных геологических процессов, таких как орогенез, трансгрессии и регрессии моря, вулканизм и т.п. Он подчеркивал, что “химический элементарный состав, как показывают нам тысячи анализов, не является простым отражением, повторением химического состава среды, а складывается в ходе длительного развития, путем взаимодействия организмов одновременно со всеми факторами эволюции”, а главной причиной приспособления организмов к химическим особенностям среды является естественный отбор (Виноградов, 1944, 1960). Таким образом, для каждого биологического вида существуют идеальные параметры содержания химических элементов, потребляемых ими в среде обитания.

Сопоставление всех этих данных с теоретическими положениями биогеохимии, позволили сформулировать логически непротиворечивую гипотезу о том, что появление устойчивых эндемических заболеваний геохимического происхождения стало возможным только после формирования человека, способного выживать и поддерживать выживание спутствующих домашних и культивируемых видов в геохимических условиях среды, существенно отличных от тех, в которых они сформировались. А именно, на ноосферном этапе эволюции биосферы. Другими словами, в доантропо-

генный период существование устойчивых во времени и пространстве эндемий геохимического генезиса было невозможно. Следовательно, любая биогеохимическая эндемия представляет собой продукт антропогенеза и является прямым следствием развития цивилизаций. Дальнейшие работы позволили убедительно подтвердить справедливость данной гипотезы. Она не только подтверждается отсутствием случаев систематического массового отравления диких животных, но и исследованиями А.П. Бужиловой, которая, исследовав причины смерти древних людей, констатировала: “На примере древних гоминид видно, что в эпоху плейстоцена уровень маркеров физиологического стресса минимален и приближается к случайному распределению значений” (Бужилова, 2001). Аналогичные результаты получены также Д.Г. Рохлиным и другими исследователями, которые проанализировав значительное количество костных останков палеолитического возраста, не смогли получить ни одного достоверного доказательства наличия хоть каких-либо эндемических заболеваний (Osborn, 1910; Рохлин, 1965).

*Самоорганизованность биосферы
в доантропогенный период*

Современная биосфера формировалась миллиарды лет и на каждом этапе своего развития представляла собой идеально сбалансированную саморегулируемую систему, характеризующуюся предельно возможной биомассой и максимальной конкуренцией организмов за ресурсы, причем конкурентным преимуществом обладают виды с максимальной геохимической энергией.

В.И. Вернадский и А.П. Виноградов показали, с одной стороны, ведущую роль организмов (живого вещества) в формировании биосферы, с другой — неоднородность ее геохимического строения и соответствие между геохимическими параметрами среды и видовой принадлежностью отдельных групп организмов, обитающих в этих условиях. В результате в первичной биосфере каждый из существовавших видов не только занимал идеально соответствующую ему экологическую нишу, но и постоянно находился именно в оптимальных для него эколого-геохимических условиях, отвечающих его физиологическим потребностям и стабильному воспроизводству. В обстановке неуклонно ускоряющейся эволюции и поступательного развития нервной деятельности (“цефализации” по Дарвину, Darwin, 1864) малейшее ослабление вида означало его быструю гибель, а малейшее преимущество, например, появление содержащего никель фермента, способного увеличивать нервную проводимость, резко увеличивало шансы на выживание, часто реализуемые одной из тысяч, а иногда из миллионов претендующих особей.

Действительно, экспериментально была выявлена выраженная дифференциация популяций одного вида по способности к росту при разном уровне концентраций определенных химических элементов в среде (например, на штаммах микроорганизмов, выделенных из почв разных биогеохимических провинций (Летунова, Ковальский, 1978; Летунова и др., 1986). Более того, в опытах была продемонстрирована способность популяций в экстремальных геохимических условиях быстро образовывать наследственно закрепленные морфы, нормально существующие в условиях, летальных для других особей вида (Prat, 1934; Bradshaw, 1971, 1984). Были проанализированы и временные параметры ответа на возникшие экстремальные условия. Первоначально из 1000 семян *Agrostis tenuis*, помещенных в субстрат с исключительно высоким содержанием свинца, выжили только 3, которых, однако, оказалось достаточно для того, чтобы положить начало новой устойчивой морфе (Bradshaw, 1952). Таким образом, было показано, что опыт, полученный в результате предшествующих этапов эволюции вида, не проходит бесследно и может быть оперативно реализован путем активации защитных механизмов, заложенных в геноме, что позволяет в течение двух–трех поколений нивелировать даже явно запредельное геохимическое воздействие. Это свидетельствует о наличии генетически закрепленного механизма, обеспечивающего выживаемость вида даже при резком изменении геохимических условий среды.

Организованность эколого-геохимических ниш, обусловленная эволюционным развитием взаимодействия организмов со средой, образно описана известным биологом и экологом Барри Коммонером: “Все в природе — от простых молекул до человека — прошло жесточайший конкурс на право существования. В настоящее время планету населяет лишь 1/1000 испытанных эволюцией видов растений и животных”. “Главный критерий эволюционного отбора — это вписанность в глобальный биотический круговорот и заполненность всех экологических ниш. У любого вещества, выработанного организмами, должен существовать разлагающий его фермент и все продукты распада должны вновь вовлекаться в БИК” (Коммонер, 1974). Основным планетарным фактором, определяющим своеобразие природных биогеохимических процессов на Земле, является климат. Таким образом, есть основание предполагать, что *оптимальной геохимической обстановкой для любого из существующих видов животных и растений до сих пор является только та, в которой данный вид был сформирован в его современном качестве в соответствии со сложившейся структурой природных зон.*

Вышеназванные предпосылки дают основание сформулировать предположение о том, что,

имея возможность зафиксировать геохимические параметры ненарушенной биосферы, можно получить характеристики, близкие к экологически и химически идеальным для большинства зональных видов животных и растений, исторически обитающих в пределах данной территории.

В теоретическом плане доказательство справедливости данного предположения означает принципиальное решение задачи по определению параметров физиологически оптимального геохимического фона для всех видов организмов, включая человека. Поскольку в начальный период своего существования человек был жестко вписан в идеально соответствующую ему экологическую нишу, любые болезни, связанные с недостатком или избытком химических элементов, не могли значимо проявиться на уровне популяции, хотя вероятность отдельных случаев исключить нельзя.

Этапы эволюции эндемической заболеваемости в ноосфере

Количество накапливаемых в ходе эволюции универсальных конкурентных преимуществ должно было неизбежно перейти в новое качество, результатом стало появление вида *Homo sapiens*, который исключительно быстро по сравнению с естественными эволюционными процессами не только приобрел возможность неконтролируемо наращивать популяцию и действовать на основе целеполагания, но и способность сознательного изменения свойств среды своего обитания. Очевидно, что такие изменения, осуществляемые одним единственным видом, быстро привели к нарушению действия сложившихся механизмов саморегуляции и саморганизации большинства систем первичной биосферы. В результате геологически мгновенно возникла качественно новая система, для названия которой В.И. Вернадский использовал термин “ноосфера”, впервые введенный П. Тейяром де Шарденом и Э. Леруа под впечатлением его геохимической концепции биосферы, изложенной в лекциях, читанных в Сорбонне в начале 20-х годов. Главными отличительными особенностями современной ноосферы являются: 1) существенная трансформация механизмов саморегуляции; 2) практически повсеместное нарушение замкнутости существующих круговоротов; 3) значительное изменение = ухудшение эколого-геохимической обстановки. Рост численности населения и борьба за ресурсы привели к “великому переселению народов” и распространению человека по всей достижимой поверхности суши, неизбежным следствием чего явилась и ситуация, при которой современный мир столкнулся с серьезными эколого-геохимическими проблемами.

Став “хозяином” планеты, человек был вынужден заплатить за это определенную цену, развившуюся в появлении ряда эндемических за-

болеваний геохимической природы. На первом этапе это были болезни природного генезиса, такие как цинга, зоб или урсовская (Кашина—Бека) болезнь. Относительно последней в книге Рохлина “Болезни древнего человека” написано: “Заслуживают большого внимания древность и географическое распространение болезни Кашина—Бека (уровской болезни). Она наблюдалась на 14 скелетах из 87, найденных во время этих раскопок. Это системное заболевание было обнаружено у людей, живших в эпоху бронзы, а также в начале нашей эры и в VIII—X вв.” (Рохлин, 1965). Колонизация новых территорий, осознанно оседлый образ жизни в непривычных геохимических условиях провоцировали возникновение устойчивых биогеохимических эндемий первого типа, для которых характерно: 1) природное происхождение; 2) поражение только человека и интродуцированных им видов растений и животных.

Истинные причины большинства этих заболеваний были выяснены только в прошлом веке и позволили найти простые и весьма эффективные (геохимические!) способы борьбы с ними. Так, цинга оказалась следствием нехватки витамина С, массово выявляемый зоб предотвращался приемом йодсодержащих препаратов и т.п. Таким образом, проблема ликвидации целых классов заболеваний может быть решена устранением несоответствий между условиями обитания и требованиями физиологического оптимума.

Следуя предложенной логике, можно сформулировать гипотезу о том, что, если удастся подтвердить эндемический (пространственно опосредованный) характер ряда других “человеческих” заболеваний, таких как, например, астма, диабет или рак (см. Романов и др., 2022), то подходы к их ликвидации могут также основываться на обнаружении несоответствий между спецификой элементного состава рационов питания местного населения и биологическими параметрами физиологического оптимума, выявленного как минимум для отдельных половозрастных групп.

На современном этапе развития общества экологическую обстановку способно значимо менять и техногенное загрязнение, ставшее причиной ранее неизвестных эндемических заболеваний, ознаменовавшее собой начало второго, качественно нового этапа их развития. Техногенное загрязнение проявляет себя в виде относительно тонкого и специфически организованного слоя элементов и соединений, наложенного на поверхность изначально неоднородного природного фона. Принимая во внимание тот факт, что такого рода загрязнения, распространяясь из точечного или реже — линейно-протяженного источника, всегда создают пространственные аномалии моноцентрического типа, легко предположить, что общая картина, формируемая в результате интер-

ференции природных и техногенных полей, может быть картографически воспроизведена и детально проанализирована.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭНДЕМИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Поставленная задача проста в постановке, но сложна в решении, которое предполагает, во-первых, знание геохимических параметров оптимума для каждого из видов, а, во-вторых, требует точного представления о пространственной эколого-геохимической специфике изучаемой территории. При этом задача поиска оптимума может быть решена двумя путями: как путем изучения геохимических обстановок на территориях, являющихся центрами происхождения исследуемых видов, так и путем нахождением экстремума на так называемой кривой В.В. Ковальского применительно к тем же видам или целым биоценозам.

Все вышесказанное позволяет в общих чертах сформулировать методический подход к решению проблемы эндемических заболеваний геохимической природы. Причем, в отличие от абсолютного большинства попыток, предпринимаемых западными и отечественными учеными, речь в данном случае идет именно о дедуктивном (от общего к частному) способе решения. Этот подход предусматривает сначала раздельное картографирование геохимического фона (отдельно естественно-природного и техногенного), после чего предполагается создание комплексной синтетической карты, отображающей сочетанное воздействие обоих исследуемых факторов. Важно, что предлагаемый подход теоретически дает возможности общего решения задачи биогеохимического районирования современной ноосферы и может быть практически реализован в рамках конкретной методической процедуры, позволяющей количественно охарактеризовать направленность, темпы, а в ряде случаев и результаты не только прошлых, но и потенциально возможных эколого-геохимических трансформаций (Коробова, 2019).

Предлагаемый подход был опробован путем составления карт риска возникновения заболеваний ЩЖ в российской части зоны, пострадавшей при аварии на ЧАЭС 1986 г. Предполагалось, что многократный рост числа заболевших раком щитовидной железы (РЩЖ) обусловлен сочетанным воздействием “йодного удара” и природного йододефицита. Таким образом, карта риска, отображающая уровень сочетанного воздействия этих двух факторов, должна была пространственно оконтуривать территории, как с максимальным, так и с минимальным уровнем заболеваемости.

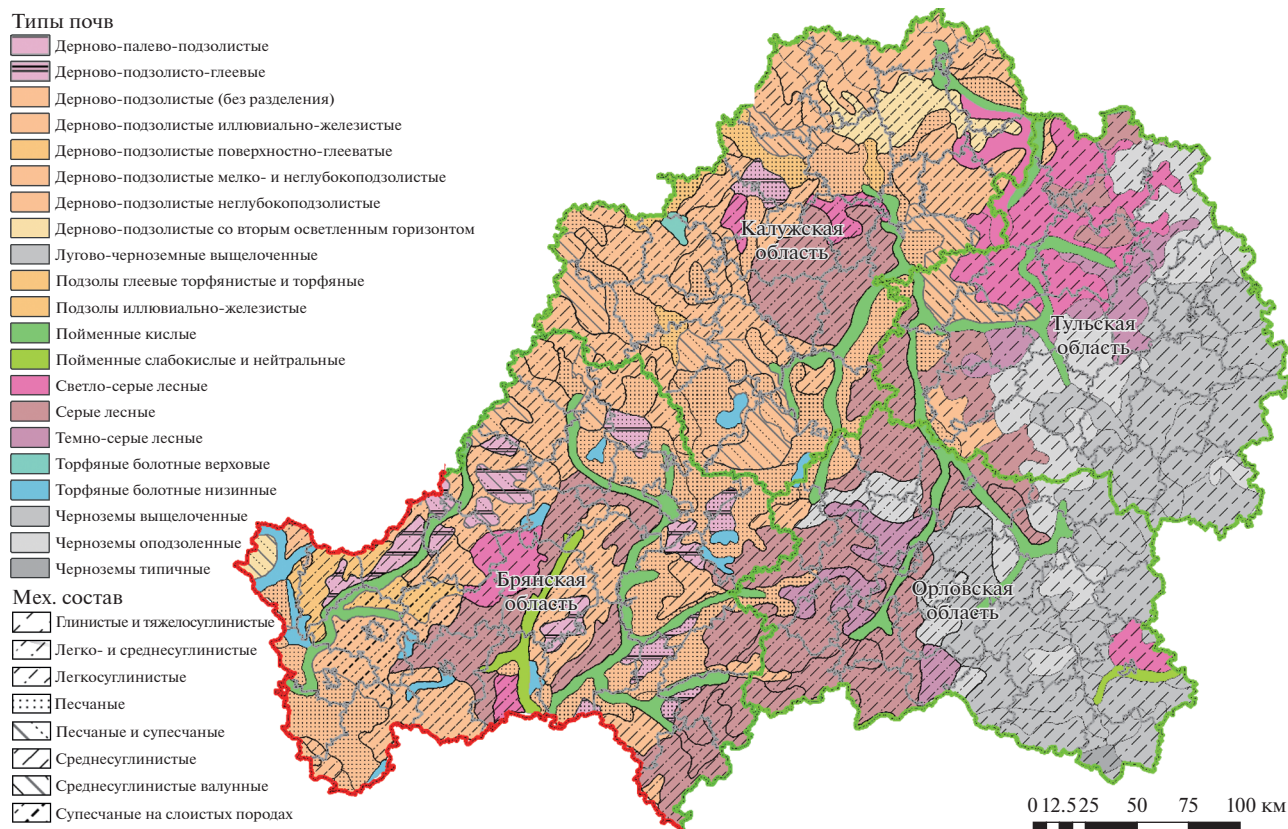


Рис. 1. Цифровая почвенная карта четырех областей РФ, наиболее пострадавших от радионуклидного загрязнения в результате аварии на ЧАЭС.

Работы, проведенные нами по изучению генезиса и эволюции физико-химических параметров современного почвенного покрова, однозначно показывают, что геохимические характеристики большинства ненарушенных почвенных ареалов могут служить универсальным маркером эколого-геохимических условий, являющихся оптимальными для существования местных биогеоценозов. Поэтому для них наиболее рациональный и быстрый способ решения “проблемы природного фона” состоит в использовании существующих почвенных карт, что позволяет с достаточно высокой точностью и детальностью проводить исследования на разных уровнях структурной организации ноосферы. Однако проблема состоит в том, что и человек, и большая часть сопутствующих ему видов животных и растений являются интродуцентами по отношению к большей части существующих природных обстановок, которые в подавляющем большинстве случаев не являются для них оптимальными.

Пример построения карты риска

Работа по построению карты риска осуществлялась средствами пакета QGIS. В качестве природной

геохимической основы использовалась почвенная карта масштаба 1 : 2500000 в пределах территорий 4-х областей РФ (Брянской, Орловской, Калужской и Тульской, рис. 1) (Алябина и др., 2014). С учетом пороговых концентраций йода в почвах В.В. Ковальского и относительной обеспеченности йодом почв разного типа территория была разделена по содержанию йода на 6 градаций от 1 (максимальная концентрация йода в почвах, минимальный дефицит) и 6 минимального (минимальное содержание йода в почвах дефицита, максимальный дефицит) (рис. 2).

Оценка уровня йододефицита для каждого сельского населенного пункта осуществлялась по формуле

$$I = \sum_{i=1}^n I_i A_i, \quad (1)$$

где I — средняя концентрация йода в исследуемом полигоне/районе; I_i — концентрация йода в почвах i -го типа с учетом почвообразующей породы; A_i — доля почвенного контура в общей площади полигона, n — число почвенных контуров в полигоне.

Полученная карта йододефицита представлена на рис 2.

Расчет интенсивности “йодного удара” – уровень техногенного загрязнения исследуемой территории радиоизотопом ^{131}I , осуществлялся по формуле И.А. Звоновой (Zvonova et al., 2010) на основе данных по плотности загрязнения ^{137}Cs . По этим результатам в этой же проекции была также построена цифровая карта, на которой исследуемая территория 4-х областей была поделена также на 6 зон в соответствии с уровнем загрязнения ^{131}I (рис. 3).

Регрессионный анализ вклада природных и техногенных факторов (природного йододефицита и загрязнения радиоизотопами йода) в риск заболеваемости РЩЖ для сельского населения четырех областей по районам проводился средствами пакета TIBCO STATISTICA 13. При этом рассчитывалась средневзвешенная обеспеченность почвенного покрова йодом и осредненный уровень загрязнения ^{131}I в радиусе 5 км от каждого НП из 2.5 тысяч аналогично подходу, предложенному ранее (Коробова, Кувылин, 2004). Результаты расчета представлены в табл. 1.

Полученные параметры позволили создать формулу, позволяющую оценить количественно вклад каждого фактора в суммарный природно-техногенный риск:

$$R = 0.72F + 0.28S, \quad (2)$$

где R – суммарный риск; F – интенсивность “йодного удара” (от 1 до 6); S – оценка природного йододефицита (от 1 до 6).

На следующем этапе полученные оценки вклада геохимических факторов были картографически сопоставлены с данными по заболеваемости раком ЩЖ сельских жителей по 93 административным районам (Иванов и др., 2005) (рис. 4).

Несмотря на значительное варьирование стандартизованного показателя заболеваемости в разных административных районах, отнесенных к одному уровню риска, что неизбежно вследствие геохимической гетерогенности районов и разного вклада местных продуктов питания в суточные рационы. Показатель сочетанного риска, рассчитанный с учетом как природных, так и техногенных факторов, имеет тенденцию положительной

Оценка концентрации I в почвах, мг/кг

- Острый дефицит (<0.5)
- Сильный дефицит (0.5–1.0)
- Дефицит (1–2)
- Умеренный дефицит (2–3)
- Слабый дефицит (3–5)
- До нормы (>5)

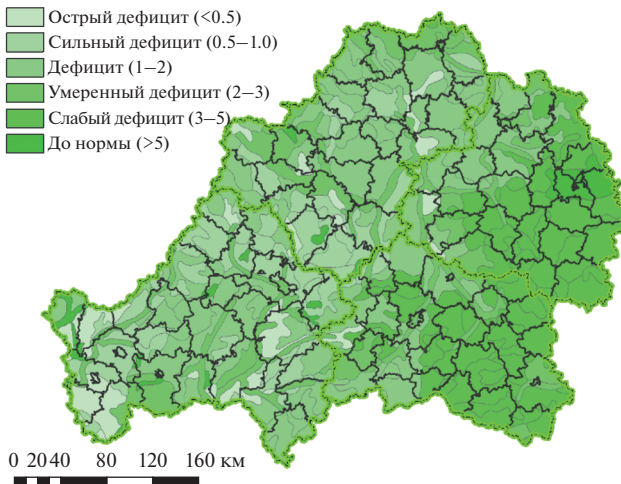


Рис. 2. Оценка уровня природного йододефицита в четырех исследуемых областях.

Йодный удар Ки/км²

- <20
- 20–50
- 50–100
- 100–150
- 150–200
- >200

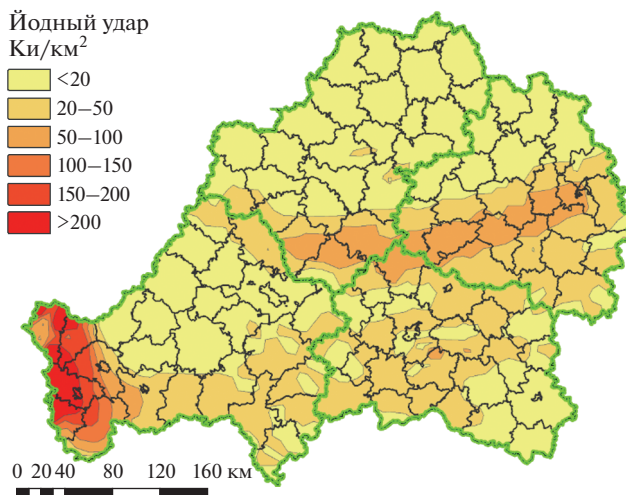


Рис. 3. Оценка “йодного удара” в четырех исследуемых областях.

корреляции с фактической заболеваемостью раками щитовидной железы ($n = 93$, рис. 5).

Полученный результат соответствует данным, ранее полученным по Брянской области, и де-

Таблица 1. Результаты суммарного вклада дефицита йода и выпадений радиоизотопа ^{131}I

Фактор	β^*	Стандартное отклонение	p -значение
Техногенное загрязнение ^{131}I	0.45	0.09	0.000003
Природный йододефицит ^{127}I	0.19	0.09	0.03
Свободный член	—	—	0.12

* β – регрессионный В-коэффициент для стандартизированных переменных, позволяющий сравнить относительные вклады каждой независимой переменной в предсказание величины зависимой переменной.

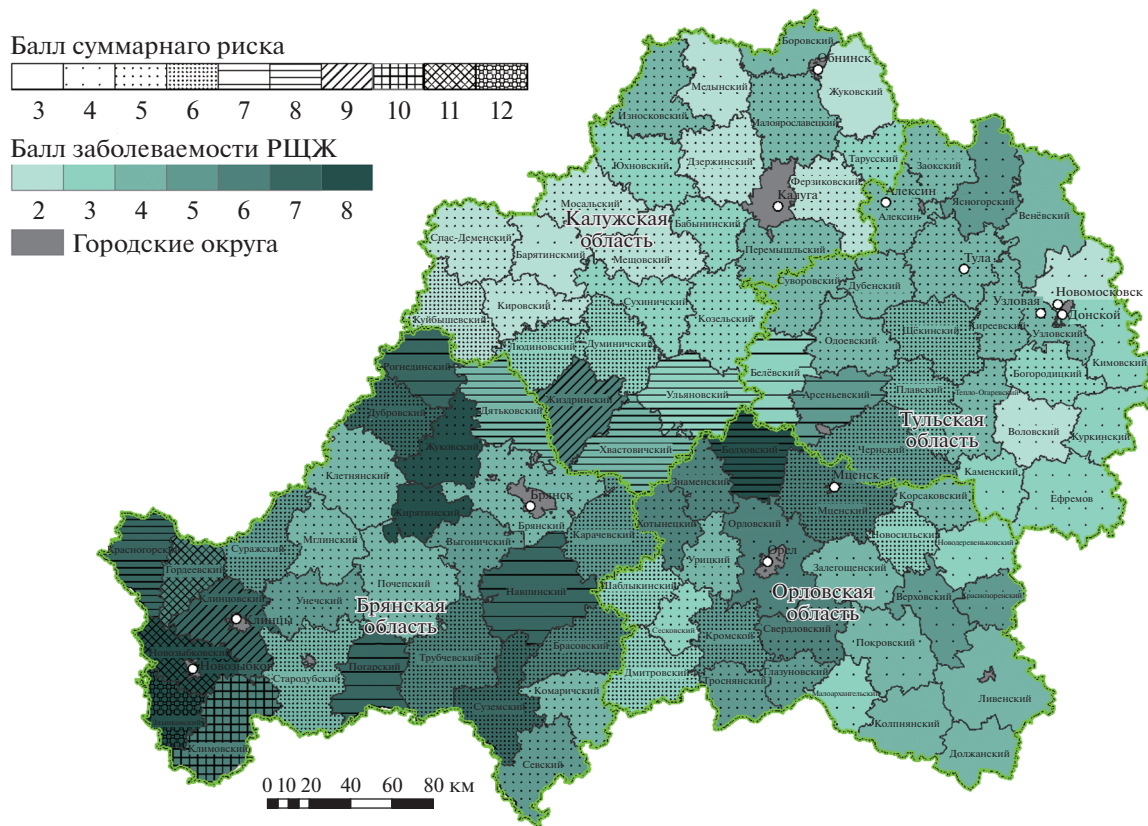


Рис. 4. Сопоставление оценки сочетанного природно-техногенного риска и заболеваемости РЗЖ по административным районам четырех областей.

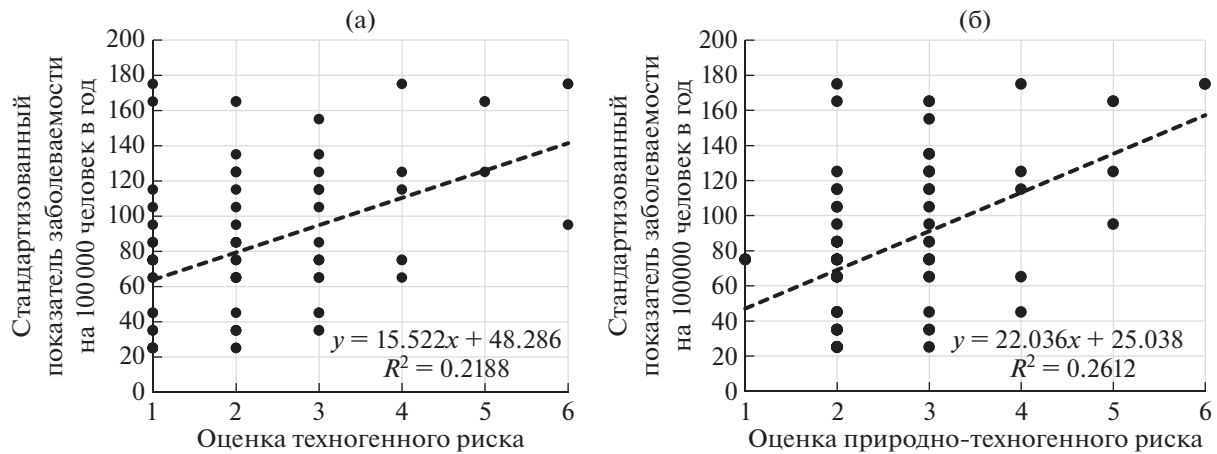


Рис. 5. Сопоставление оценок геохимического риска и фактической заболеваемости РЗЖ по административным районам 4-х областей.

монстрирует принципиальную возможность сопряженного картографического анализа геохимической и медицинской информации, анализируемой на уровне административных единиц деления. Вместе с тем, полученный опыт показы-

вает, что сопоставление геохимической и медицинской информации более целесообразно вести на уровне населенных пунктов, поскольку в данном случае есть возможность, с одной стороны, избежать ошибок осреднения интегрирующих

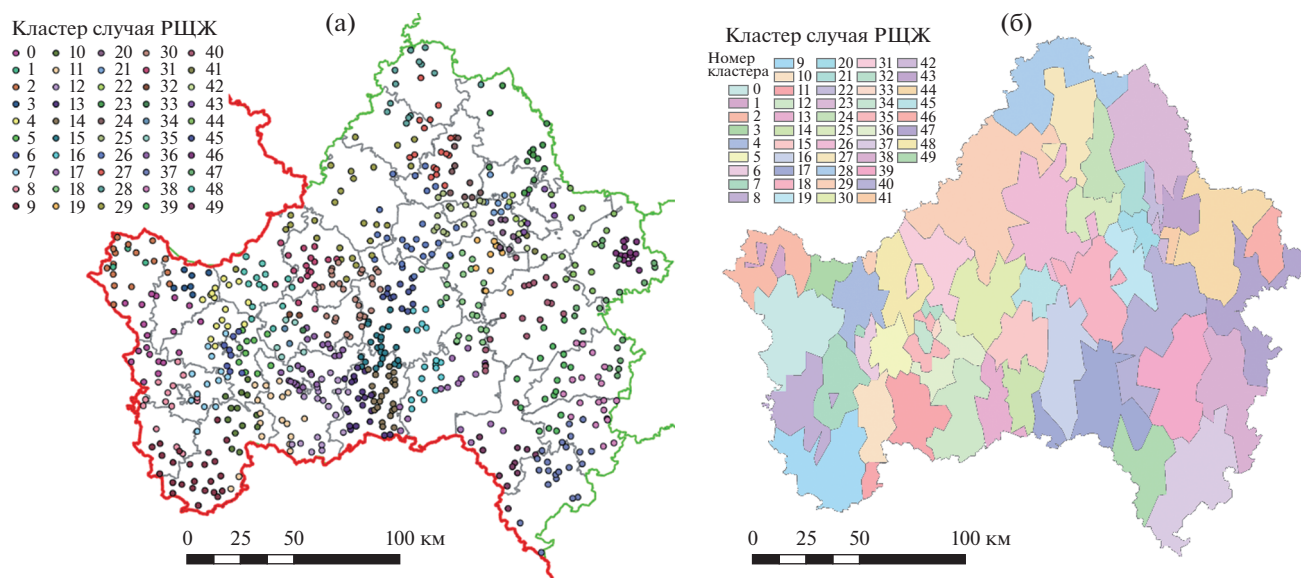


Рис. 6. Пространственная кластеризация зарегистрированных случаев рака щитовидной железы в сельских НП Брянской области (а) и районирование территории на основе кластеризации (б).

влияние аномалий малого размера, а, с другой стороны, точнее учесть вклад местных продуктов питания и воды в рационы жителей.

На следующем этапе для более точного учета местной обстановки использовались геохимические и медицинские данные по отдельным сельским населенным пунктам (НП) Брянской области.

Для оценки геохимических параметров использовались как оригинальные базы данных по содержанию йода в пробах почв, питьевых вод и молока, отобранных в ходе полевых работ 2007–2021 гг. (Коробова и др., 2017; Коробова и др., 2020), так и опубликованные данные по радиоактивному загрязнению Брянской области. Поскольку среди питьевых вод сельского населения области преобладают воды централизованного водоснабжения (водопроводы и водоразборные колонки), в дальнейшем оценка проводилась по водам из этих источников. Техногенный фактор – выпадение ^{131}I вследствие аварии на Чернобыльской АЭС – рассчитывался для каждого НП, путем пересчета данных о загрязнении его ^{137}Cs (Питкевич и др., 1993) по (Zvonova et al., 2010).

Встречаемость РЩЖ оценивалась по реляционной базе медицинских данных, содержащей обезличенную информацию о случаях РЩЖ, выявленных в Брянской области за период с 1990 г. по 2020 г. с привязкой каждого выявленного случая к конкретному НП. Для анализа отбирались случаи, зарегистрированные только в сельских населенных пунктах (поселки, не наделенные статусом городского населенного пункта, сёла, деревни, хутора) (Закон..., 2004).

По этим данным вокруг каждого из сельских НП с хотя бы одним зарегистрированным случаем РЩЖ были построены полигоны Вороного (Voronoi, 1908), после чего с использованием алгоритма редистриктинга они были объединены в более крупные выделы (Levin, Friedler, 2019), что позволило сформировать максимально компактные кластеры, характеризующиеся равным числом выявленных случаев онкозаболеваний в каждом конкретном кластере (рис. 6).

Преимуществами данного метода служат, во-первых, возможность перехода от точечных объектов на уровне отдельных населенных пунктов, к полигональным, а, во-вторых, в возможность применения ГИС-технологий для последующей статистической оценки вклада геохимических факторов, пространственно сопряженных с дифференцированной по уровню заболеваемости среди местного населения.

Территория Брянской области описанным выше методом была разделена на 50 участков (кластеров) с относительно равным уровнем встречаемости РЩЖ среди сельского населения (рис. 7).

Для статистической оценки значимости вклада изученных геохимических факторов, выделенные участки были количественно стратифицированы на 5 групп с относительно равным уровнем РЩЖ (по 10 участков в каждой), что позволяло анализировать выборку дифференцированно. Таким образом, в каждой из групп фиксировалось не менее 300 случаев РЩЖ (рис. 7, 8).

Поскольку практически все исследуемые геохимические параметры имеют распределение, отличное от нормального (рис. 9а, 9б), для выявления

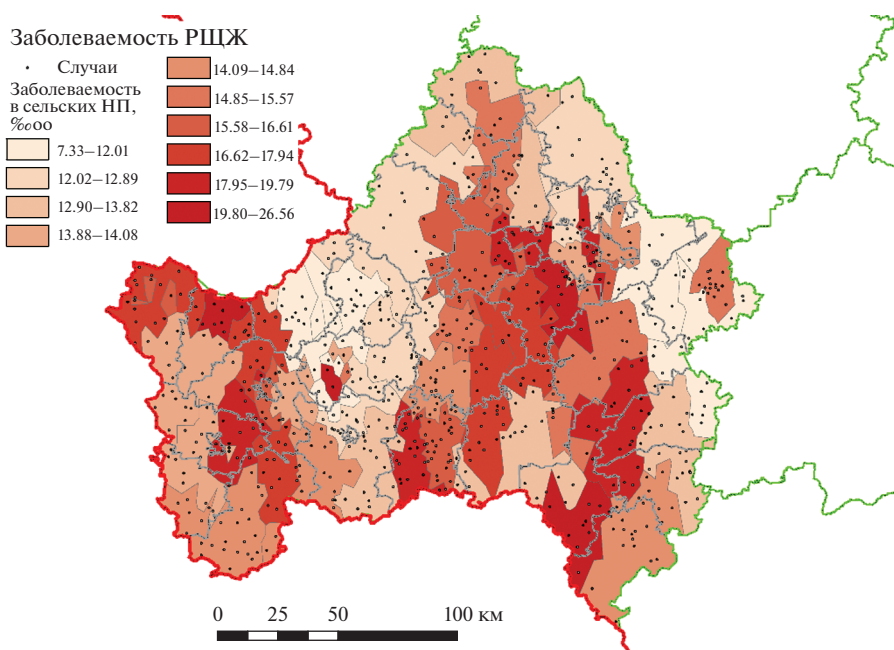


Рис. 7. Зоны заболеваемости РЦЖ сельских жителей Брянской области с 1990 по 2020 гг., полученные путем редистриктинга полигонов Вороного (составлено по данным Брянского клинико-диагностического центра).

статистически значимых различий использовался ранговый U критерий Манна–Уитни (Mann, Whitney, 1947) по выделам с контрастной (максимальной и минимальной) заболеваемостью РЦЖ, обозначенным на рис. 8.

Согласно полученным данным, выделы с максимальной заболеваемостью РЦЖ значимо отличаются от выделов с минимальной большим уровнем выпадения ^{131}I ($Z = 12.10$, $p < 0.001$), меньшим содержанием Mg ($Z = -1.72$; $p = 0.086$) и

K ($Z = -2.59$; $p = 0.010$) в питьевых водах, стабильного I в водах ($Z = -1.87$; $p = 0.062$) и почвах ($Z = -3.009$; $p = 0.003$) (табл. 2).

Таким образом, значимая пространственная неоднородность заболеваемости раком щитовидной железы среди сельского населения Брянской области была оценена картографическим методом и в результате было выявлено значимое различие зон с максимальным и минимальным уровнем заболеваемости. Статистический анализ позволил также выявить связь заболеваемости с уровнем загрязнения радиоактивным изотопом йода и содержанием йода в питьевых водах и почвах, а также с обеспеченностью питьевых вод магнием и калием, что, несомненно, заслуживает дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные теоретические и методические подходы к решению проблемы ликвидации эндемических заболеваний геохимической природы, несомненно, имеют важное практическое значение. Особая значимость состоит в том, что разработанный подход универсален и открывает возможность построения карт, характеризующих вероятность возникновения (риска) практически любых эндемических заболеваний. В этом отношении, представляется перспективной проверка эндемического характера (пространственной приуроченности) и других, в первую очередь, таких распространенных неинфекционных заболеваний, как диабет, астма, артроз и т.п.

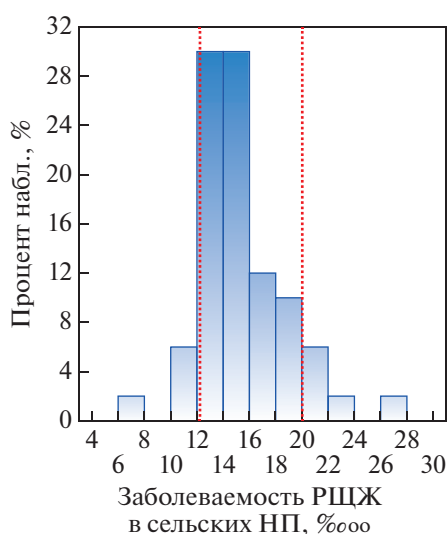


Рис. 8. Распределение нормализованных показателей заболеваемости сельского населения РЦЖ в выделенных зонах.

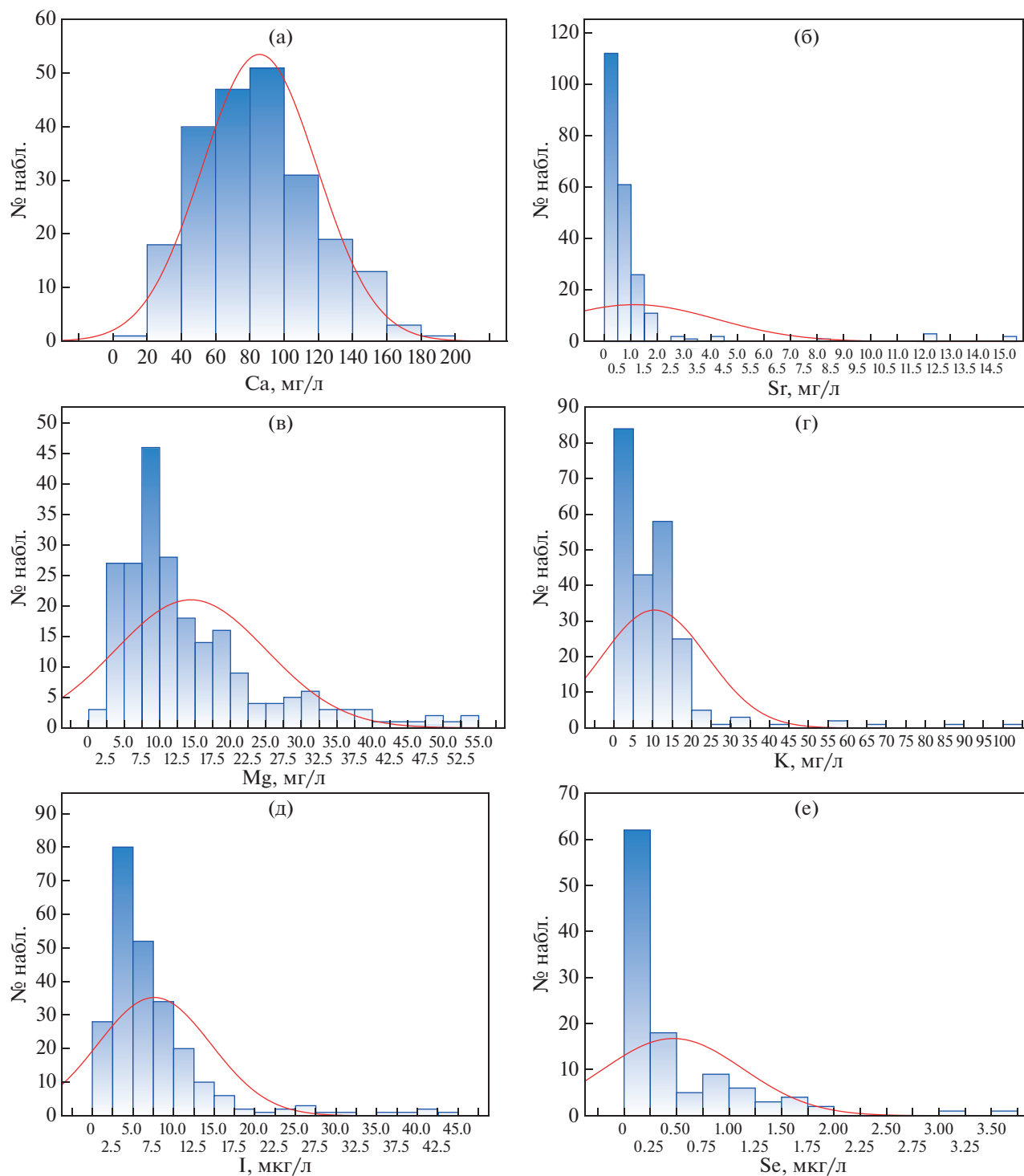


Рис. 9. Гистограммы распределения некоторых геохимических показателей питьевых вод централизованного водоснабжения Брянской области (Коробова и др., 2017) концентрации в мг/л а – Ca, б – Sr, в – Mg, г – K; в мкг/л: д – I, е – Se (красной линией везде показаны параметры нормального распределения).

На этом пути не менее важную и тоже не решенную пока проблему представляет построение детальных карт заболеваемости, позволяющих оконтуривать выделы, характеризующиеся достоверно разным уровнем риска возникновения

той или иной болезни. Трудность состоит не только в проблемности получения медицинской информации, но и в создании подходов к картографическому отображению величин вероятности реализации редких событий. В этом отноше-

Таблица 2. Оценка статистической значимости различий по отдельным геохимическим параметрам в зонах минимальной и максимальной заболеваемости РЦЖ среди сельских жителей Брянской области

Геохимический параметр	U	Z	p	N _{min}	N _{max}
Концентрация в питьевых водах централизованного водоснабжения					
Ca, мг/л	526	–1.107	0.268	25	50
Sr, мг/л	577	–0.534	0.593	25	50
Mg, мг/л	472	–1.720	0.086	25	50
K, мг/л	394	–2.591	0.010	25	50
Na, мг/л	493	–1.478	0.139	25	50
Mn, мг/л	497	1.076	0.282	24	49
Zn, мг/л	46	–2.286	0.022	9	22
Fe, мг/л	528	0.429	0.668	23	49
Si, мг/л	73	2.740	0.006	14	23
Ba, мг/л	53	–2.757	0.006	14	18
S, мг/л	51	1.083	0.279	10	14
HCO ₃ [–] , мг/л	446	–1.532	0.126	26	44
F [–] , мг/л	424	0.960	0.337	26	38
Cl [–] , мг/л	531	–0.183	0.855	26	42
SO ₄ ^{2–} , мг/л	515	0.437	0.662	25	44
NO ₃ [–] , мг/л	525	–0.571	0.568	26	44
PO ₄ ^{3–} , мг/л	298	–1.738	0.082	24	34
Жёсткость, мг/экв	111	0.101	0.919	12	19
pH	256	–3.022	0.003	26	36
Минерализация, мг/л	399	0.008	0.994	21	38
I[–], мкг/л	521	–1.866	0.062	27	52
Se, мкг/л	59	–1.464	0.143	9	20
Выпадение I-131 на 10.05.86, Ки/км²	27815	12.099	0.000	588	214
I в картофеле, мкг/кг	2882	–0.811	0.417	63	99
I в почве ЛПХ (0–10 см), мкг/кг	198	–3.009	0.003	29	26
I в почве ЛПХ (10–20 см), мкг/кг	575	–1.447	0.148	34	42
I в молоке, мкг/кг	1465	–1.517	0.129	50	70

Примечания. Обозначения: Z – пересчет U-критерия на нормальное распределение; p – уровень значимости; N_{min} – число проб в зонах минимальной заболеваемости; N_{max} – число проб в зонах максимальной заболеваемости. Жирным шрифтом выделены параметры с $p \leq 0.100$.

нии, наш опыт показал, что, несмотря на очевидные сложности, все вышеназванные проблемы имеют технический характер, а, следовательно, должны быть заведомо решаемы. При этом не исключено, что успешная реализация созданных методических подходов может (как это было в случае с цингой) способствовать и полной ликвидации целых классов “человеческих” заболеваний, причем не только в России, но и во всем мире.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории биогеохимии окружающей среды В.Ю. Березкину, Д.И. Долгушину, В.Н. Даниловой и др. за активное участие в полевых и/или лабораторных исследованиях, а также С.Л. Романову (УП “Геоинформационные системы”, Республика Беларусь) за ценные консультации. Авторы особенно признательны А.В. Силенку и И.В. Курносой (Брянский клинико-диагностический центр) за

предоставление медицинской информации по заболеваемости жителей в отдельных населенных пунктах области, необходимой для более точного пространственного сопоставления геохимических и медицинских данных.

Искренне благодарны рецензентам и научному редактору Татьяне Михайловне Минкиной за комментарии и советы, которые способствовали улучшению изложения и представления материалов и результатов.

Исследование выполнено в рамках госзадания лаборатории с частичным привлечением средств грантов РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алябина И.О., Андроханов В.А., Вершинин В.В., Волков С.Н., Ганжара Н.Ф., Добровольский Г.В., Иванов А.В., Иванов А.Л., Иванова Е.А., Ильин Л.И., Карпачевский М.Л., Каштанов А.Н., Кирюшин В.И., Колесникова В.М., Колесникова Л.Г., Лойко П.Ф., Манылов И.Е., Маречек М.С., Махинова А.Ф., Молчанов Э.Н., Прохоров А.Н., Пягай Э.Т., Рожков В.А., Рыбальский Н.Н., Савин И.Ю., Самойлова Н.С., Сапожников П.М., Сизов В.В., Столбовой В.С., Суханов П.А., Урусевская И.С., Чочаев А.Х., Шермет Б.В., Шоба С.А., Яковлев А.С. (2014) Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Тула: Гриф и К, 768 с.
- Бужилова А.П. (2001) Адаптивные процессы у древнего населения Восточной Европы (по данным палеопатологии). Дис. ... докт. ист. наук. М.: Федеральное Государственное учреждение науки Институт археологии, 601 с.
- Вернадский В.И. (1901) О значении трудов М.В. Ломоносова в минералогии и геологии. *Ломоносовский сборник. Материалы для истории развития химии в России*. М.: Товарищество типографии А.Н. Мамонтова, 54-87.
- Вернадский В.И. (1911) Несколько слов о работах Ломоносова по минералогии и геологии. *Труды Ломоносова в области естественно-исторических наук*. СПб.: Издание Императорской Академии наук, 141-149.
- Вернадский В.И. (1926) Биосфера (Очерк первый. Биосфера в космосе. Очерк второй. Область жизни). Л.: Изд-во научно-технической литературы, 146 с.
- Вернадский В.И. (1980) Несколько слов о ноосфере. Проблемы биогеохимии. Труды биогеохимической лаборатории. Т. 16. М.: Наука, 212-222.
- Виноградов А.П. (1938) Биогеохимические провинции и эндемии. *ДАН СССР*. **18**(4/5), 283-286.
- Виноградов А.П. (1944) Геохимия рассеянных элементов морской воды. *Успехи химии*. **13**(1), 3-34.
- Виноградов А.П. (1960) О генезисе биогеохимических провинций. Труды Биогеохимической лаборатории Института геохимии и аналитической химии РАН. Т. 11. М.: ГЕОХИ АН СССР, 3-7.
- Горбачев А.Л., Добродеева Л.К., Теддер Ю.Р., Шацова Е.Н. (2007) Биогеохимическая характеристика северных регионов. Микроэлементный статус населения Архангельской области и прогноз развития эндемических заболеваний. *Экология человека*. (1), 4-11.
- Докучаев В.В. (1899) К учению о зонах природы. СПб.: Типография СПб. Градоначальства, 28 с.
- Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. (2018) Биогеохимическая индикация микроэлементозов. М.: РАН, 388 с.
- Закон Брянской области "О внесении изменений в Закон Брянской области "Об административно-территориальном устройстве Брянской области" от 01.10.2004 N 60-3 (2004). *Брянская неделя*. (40).
- Иванов В.К., Цыб А.Ф., Максютков М.А., Горский А.И., Марченко Т.А., Кайдалов О.В., Корело А.М., Чекин С.Ю., Петров А.В., Бирюков А.П. (2005) Основные результаты радиационно-эпидемиологического анализа данных РГМДР (к 20-летию Чернобыля). *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. (специальный выпуск 3), 6-111.
- Ковальский В.В. (1974) Геохимическая экология. М.: Наука, 299 с.
- Ковальский В.В., Андрианова Г.А. (1970) Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 179 с.
- Ковальский В.В., Раецкая Ю.И., Грачева Т.И. (1971) Микроэлементы в растениях и кормах. М.: Колос, 235 с.
- Коммонер Б. (1974) Замыкающийся круг. Ленинград: Гидрометеиздат, 280 с.
- Коробова Е.М. (2019) Эколого-геохимические проблемы современной биосферы. М.: РАН. 122 с.
- Коробова Е.М., Баранчуков В.С., Березкин В.Ю., Колмыкова Л.И., Громяк И.Н., Чесалова Е.И., Корсакова Н.В., Хушвахтова С.Д. (2017) База данных, охраняемая авторскими правами "Брянск-БД-вода". *Официальный бюллетень "Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем"*. (11), 42.
- Коробова Е.М., Баранчуков В.С., Березкин В.Ю., Колмыкова Л.И., Данилова В.Н. (2020) База данных, охраняемая авторскими правами "Брянск-БД-молоко". *Официальный бюллетень "Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем"*. (11), 36.
- Коробова Е.М., Кувьлин А.И. (2004) Природные биогеохимические провинции с низким содержанием йода как районы дополнительного экологического риска в зонах воздействия аварии на Чернобыльской АЭС. *Материалы V биогеохимических чтений "Биогеохимическая индикация аномалий"*. М.: Наука, 156-167.
- Летунова С.В., Алексеева С.А., Коробова Е.М. (1986) Концентрирование йода грибом *Penicillium chrysogenum*, обитающим в почвах Нечерноземной зоны. *Биологические науки*. (10), 94-98.
- Летунова С.В., Ковальский В.В. (1978) Геохимическая экология микроорганизмов. М.: Наука, 148 с.
- Малхазова С. М. (2001) Медико-географический анализ территорий: картографирование, оценка, прогноз. М.: Научный мир, 240 с.
- Питкевич В.А., Шершаков В.М., Дуба В.В., Чекин С.Ю., Иванов В.К., Вакуловский С.М., Махонько К.П., Волокитин А.А., Цатуров Ю.С., Цыб А.Ф. (1993) Реконструкция радионуклидного состава выпадений на территории России вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиация и риск*. (3), 39-61.
- Рихванов Л.П., Соколов Б.Р., Барановская Н.В., Агеева Е.В., Беляновская А.И., Дериглазова М.А., Юсупов Д.В., Эпова Е.С., Солодухина М.А., Замана Л.В.,

- Михайлова Л.А., Большунова Т.С., Миронова А.С., Наркович Д.В., Судыко А.Ф., Полякова Д.А. (2021) Комплексные геохимические исследования компонентов природной среды в эндемичных районах Забайкалья. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* **332**(2), 7-25.
- Романов С. Л., Червань А. Н., Коробова Е. М. (2022) Особенности пространственного распространения онкологических заболеваний на территории Гомельской и Могилевской областей Беларуси. *Доклады Национальной академии наук Беларуси.* **66**(1), 91-103.
- Рохлин Д.Г. (1965) Болезни древних людей. М.: Наука, 302 с.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. (1990) Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 335 с.
- Bineshpour M., Payandeh K., Nazarpour A., Sabzalipour S. (2021) Status, source, human health risk assessment of potential toxic elements (PTEs), and Pb isotope characteristics in urban surface soil, case study: Arak city, Iran. *Environ. Geochem. Health.* **43**(12), 4939-4958.
- Bradshaw A.D (1952). Populations of *Agrostis tenuis* resistant to lead and zinc poisoning. *Nature.* 169, 1098.
- Bradshaw A.D. (1971) Plant evolution in extreme environments. Ecological genetic and evolution (ed. Creed R.). New York: Springer, 79-93.
- Bradshaw A.D. (1984) *Adaptation of plants to soils containing toxic metals – a test for conceit. Origins and development of adaptation* (ed. Evered D., Collins G.M.) London: Pitman, 4-20.
- da Silva C.R., Figueiredo B.R., de Capitani E.M., Cunha F.G. (2010) Medical geology in Brazil: enviromental and health effects of toxic on materials geological factors. Rio de Janeiro: CPRM; FAPERJ. 220 p.
- Dana J.D. (1864) *The Classification of Animals Based on the Principle of Cephalization: Classification of Herbivores. Whitefish*, Kessinger Publishing, LLC, 34 p.
- Dissanayake C.B., Chandrajith R. (2009) *Introduction to medical geology: focus on tropical environments*. Berlin: Springer-Verlag, 297 p.
- Evstafeva E., Baranovskaya N., Bogdanova A., Ablialimov O., Macarova A., Evstafeva I., Yaseneva E. (2019) Elemental composition of human hair in different territories of the Crimean peninsula. *E3S Web of Conf.* 98, 02001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199802001>
- Kist A.A., Zhuk L.I., Danilova E.A., and Mikholskaya I.N. (1998) Mapping of Ecologically Unfavorable Territories Based on Human Hair Composition. *Biol. Trace Elem. Res.* **64**, 1-12.
- Levin H.A., Friedler S.A. (2019) Automated Congressional Redistricting. *ACM J. Exp. Algorithmics.* **24**, 1-24.
- Li J., Wu G. (1999) *Atlas of the Ecological Environmental Geochemistry of China*. Beijing: Geological Press, 209 p.
- Mann H.B., Whitney D.R. (1947) On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Ann. Math. Statist.* **18**(1), 50-60.
- Osborn H.F. (1910) The Age of Mammals in Europe, Asia and North America. New York: The Macmillan Company, 636 p.
- Paterson E. (2011) Geochemical atlas for Scottish Topsoils. Glasgow: The Macaulay Land Use Reserach Institute, 45 p.
- Prat S. (1934) Die erblichkeit der Resistenz gegen Kupfer. *Ber. Dtsch. bot. Ges.* **1**, 65-67.
- Reimann C., Caritat P. (2012) Chemical Elements in the Environment. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 389 pp.
- Thornton I. (2010) Research in Applied Environmental Geochemistry, with particular reference to Geochemistry and Health. *GEEA.* **10**(3), 317-329.
- Thornton I., Webb J.S. (1979) Geochemistry and Health in the United Kingdom. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences.* **288**(1026), 151-168.
- Voronoi G. (1908) Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Premier mémoire. Sur quelques propriétés des formes quadratiques positives parfaites. *J. für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)* **(133)**, 97-102.
- Watts M.J., Maseka K.K., Mutondo M., Sakala G., Olantunji A.S. (2020) Preface for special issue: Geochemistry for sustainable development. *Environ. Geochem. Health* **42**(4), 1045-1046.
- Xiang W. (1989) The atlas of endemic diseases and their environments in the people's Republic of China: by the Editorial Board of The Atlas of Endemic Diseases and Their Environments in the People's Republic of China. Beijing: Science Press, 216 p.
- Zvonova I., Krajewski P., Berkovsky V., Ammann M., Dufafa C., Filistovic V., Homma T., Kanyar B., Nedveckaite T., Simon S.L., Vlasov O., Webbe-Wood D. (2010) Validation of 131I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia. *J. Environmental Radioactivity.* **101**(1), 8-15.