



УДК 551.248.2,628.16
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-284-297

Эколого-гидрогеохимические особенности подземных вод геотектонических зон Липецкого горнодобывающего района

Бударина В.А., Косинова И.И., Лепендин Д.Г.
Воронежский государственный университет
Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1
E-mail: kosinova777@yandex.ru, budarinav@yandex.ru

Аннотация. Геотектоническая активность элементов земной коры формирует эколого-геохимические аномалии различного качественного и количественного характера. Как правило, в пределах платформенных областей тектоническая активность проявляется в виде разломной тектоники. Участки разломных зон являются путями проникновения на поверхность комплекса металлов и неметаллоидов глубинного происхождения. Их концентрирование в подземных водах формирует патогенные экологические эффекты. Целью настоящей работы является изучение эколого-гидрогеохимических особенностей подземных вод, которые приурочены к зонам активной геотектонической деятельности в пределах Липецкого горнопромышленного района. Представлен анализ основных неотектонических структур, даны пространственные характеристики разломных зон, их место в рельефе и особенности геологического строения. Значимость данных исследований определена дифференцированием загрязнений подземных вод природного и техногенного характера, формирующегося в пределах зон влияния объектов горнодобывающей деятельности. Методика исследований включала комплекс предполевых работ по выделению зон активной тектонической деятельности. Она базировалась на схеме неотектонических структур Липецкой области. Бор обозначен как маркирующий элемент, характеризующийся исключительно природным происхождением. Пробоотбор подземных вод неоген-четвертичного и девонского водоносных комплексов осуществлялся в пределах выделенных зон. Результаты исследований систематизированы в формате геоинформационной модели эколого-гидрогеохимических аномалий бора на территории Липецкой области. Выявлена их приуроченность к осевым линиям областей динамического влияния разломов фундамента, линеаментам. Помимо повышенных концентраций бора (до 15 ПДК), в подземных водах отмечены значительные превышения по лантану (до 1000 ПДК), бериллию (до 300 ПДК), титану (до 10 ПДК). Выявлены максимальные превышения для девонских водоносных комплексов. При анализе зон влияния горнодобывающей деятельности наличие бора и вышеперечисленных элементов является маркирующим комплексом природного происхождения.

Ключевые слова: экология, гидрогеохимия, подземные воды, горнодобывающая деятельность, бор, маркирование, элемент, модель

Благодарности: статья подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, договор № 20-55-00010 от 30.04.2020 г. и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор № X20P-284 от 04.05.2020 г.

Для цитирования: Бударина В.А., Косинова И.И., Лепендин Д.Г. 2022. Эколого-гидрогеохимические особенности подземных вод геотектонических зон Липецкого горнодобывающего района. Региональные геосистемы, 46(2): 284–297. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-284-297

Ecological and Hydrogeochemical Features of Groundwater of Geotectonic Zones of the Lipetsk Mining Region

Victoria A. Budarina, Irina I. Kosinova, Denis G. Lependin

Voronezh State University,

1 Universitetskaya Sq., Voronezh, 394018, Russia

E-mail: kosinova777@yandex.ru, budarinav@yandex.ru

Abstract. Geotectonic activity of the elements of the earth's crust forms ecological and geochemical anomalies of various qualitative and quantitative nature. As a rule, within the platform areas, tectonic activity manifests itself in the form of fault tectonics. Areas of fault zones are ways of penetration into the surface of the complex of metals and nonmetalloids of deep origin. Their concentration in groundwater forms pathogenic environmental effects. The purpose of this work is to study the ecological and hydrogeochemical features of groundwater, which are confined to the zones of active geotectonic activity within the Lipetsk mining region. The analysis of the main neotectonic structures is presented, the spatial characteristics of fault zones, their place in the relief and the features of the geological structure are given. The significance of these studies is determined by the differentiation of groundwater pollution of natural and man-made nature, formed in the nature of the mining activity within the zones of influence of the mining activity. The research methodology included a set of pre-field works on the allocation of zones of active tectonic activity. It was based on the scheme of neotectonic structures of the Lipetsk region. Boron is designated as a marking element characterized solely by natural origin. Groundwater sampling of the Neogene Quaternary and Devonian aquifer complexes was carried out within the selected zones. The results of the research are systematized in the format of a geoinformation model of ecological and hydrogeochemical anomalies of boron in the Lipetsk region. Their confinement to the centerlines of the areas of dynamic influence of foundation faults, laminae is revealed. In addition to increased concentrations of boron (up to 15 MPC), significant exceedances of lanthanum (up to 1000 MPC), beryllium (up to 300 MPC), titanium (up to 10 MPC) were noted in groundwater. Maximum exceedances for Devonian aquifer complexes were revealed. When analyzing the zones of influence of mining activities, the presence of boron and the above elements is a marking complex of natural origin.

Keywords: ecology, hydrogeochemistry, feature, underground water, mining, boron, marking, element, model

Acknowledgments: The article was prepared with the support of the Russian Foundation for Basic Research, contract №20-55-00010 of 30.04.2020 and the Belarusian Republican Foundation for Basic Research, contract №X20P-284 dated 04.05.2020.

For citation: Budarina V.A., Kosinova I.I., Lependin D.G. 2022. Ecological and Hydrogeochemical Features of Groundwater of Geotectonic Zones of the Lipetsk Mining Region. *Regional Geosystems*, 46(2): 284–297 (in Russian). DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-284-297

Введение

Важной проблемой на национальном уровне является разработка и оценочные процедуры использования эколого-экономических показателей антропогенного воздействия на водные ресурсы, включающих оценки объемов используемых водных ресурсов с учетом экологической составляющей стока [Koronkevich et al., 2020]. В этой связи пока недооценённым аспектом проблемы управления водными ресурсами на водосборной площади является изучение взаимосвязи подземных и поверхностных вод, которая видоизменяется в связи с различиями геологического строения той или иной территории [Schyns et al., 2019; Siddique et al., 2020; Zhiltsov et al., 2020]. Это, в частности, обусловлено и тем, что при усилении антропогенных воздействий на ресурсы поверхностного стока происходит переход на использование подземных вод как основного источника для хозяйственно-



питьевого, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения. Различные аспекты рационального использования подземных вод (оценка и динамика их минерализации, вклад источников загрязнения, обоснование природных индикаторов для гидрогеологических исследованиях и др.) отражены в публикациях отечественных [Силин, 2007; Закутин и др., 2012; Новиков, 2014; Бочаров, Колесова, 2017] и зарубежных ученых [Coxito Afonso, 2003; Eliopoulos et al., 2012; Katsanou et al., 2012; Dragovic et al., 2014; Al-Hilal, 2016]. Дистанционное зондирование и ГИС применяют для первичного определения площадей и местоположений концентрации подземных вод с использованием различных модулей пространственного анализа в программах дистанционного зондирования и ГИС, таких как *ENVI 4.5*, *ARCGIS 9.3* [Thach et al., 2010]. Анализ временных рядов данных *GPS* и *InSAR* (интерферометрический радар с синтезированной апертурой) является важным инструментом для оценки деформации земной поверхности – локализации горизонтальных и вертикальных движений и получения новой информации в поддержку различных геодинамических моделей [Zoran et al., 2017].

Многоаспектный анализ геозкологических ситуаций в горнодобывающих комплексах Курской магнитной аномалии, пути выхода из складывающегося эколого-технологического кризиса находят отражение в исследованиях ученых Центрально-Черноземного экономического района¹ [Трубецкой и др., 2004; Лисецкий и др., 2004; Кравчук, Сергеев, 2012; Голик и др., 2013; Корнилов и др., 2015; и др.]. Многоотраслевая структура промышленности Липецкой области с ведущей ролью черной металлургии позволила региону занять первое место в ЦФО по объему промышленного производства на душу населения.

Липецкая область расположена на северо-восточном склоне Воронежской антеклизы Русской плиты в составе Восточно-Европейской платформы. Архейско-раннепротерозойский фундамент залегает на глубине менее 1 км. Осадочный чехол состоит из девонских и кайнозойских (неоген-четвертичных) отложений. Девонские отложения представлены известняками, доломитами, мергелями, песчаниками, глинами и алевролитами. Девонские отложения как правило залегают на глубине нескольких десятков метров, но вскрываются в долинах рек.

Липецкая область располагается в пределах двух тектонических структур: Среднерусской возвышенности и Окско-Донской низменности. Структурными элементами Среднерусской возвышенности (рис. 1) являются [Косинова и др., 2006; 2020]:

1. Новосильское поднятие;
2. Трубетчинская структурная терраса;
3. Кшень-Оскольская структурная терраса;
4. Елецко-Ливенский прогиб.

Данные структуры слагают западную и центральную части области.

Тектонические структуры Окско-Донской низменности включают:

5. Кривоборский прогиб;
6. Салтыковский прогиб;
7. Шуклавкинское поднятие.

Данные структуры залегают в восточной части Липецкой области. Следует подчеркнуть, что вся территория тектонически активна, о чем свидетельствует значительное количество разнонаправленных разломных зон. При этом основные тектонические структуры ориентированы меридионально. Соответственно, рисунок речной сети также, в основном, сориентирован в направлении север-юг.

¹ Лисецкий Ф.Н., Голусов П.В., Чепелев О.А., Близнюк М.В., Кухарук Н.С., Свиридова А.В. 2006. База данных эколого-геохимического обследования территории Курской магнитной аномалии (в границах Губкинского и Старооскольского районов Белгородской области). Свидетельство о регистрации базы данных № 2006620102 RU

В геологическом разрезе Липецкой области принимают участие породы неоген-четвертичного возраста, залегающие на отложениях девона.

Неоген-четвертичные отложения имеют в основном ледниковый и водноледниковый генезис и представлены песками, супесями и суглинками. Девонские отложения представлены карбонатными породами: известняками, мергелями, доломитами [Бочаров, 2009; Косинова, Ляпин, 2020].

Для питьевого водоснабжения Липецкой области в основном эксплуатируются неоген-четвертичный (N-Q), задонско-елецкий (D_3 zd-el), евланово-ливенский (D_3 ev-lv) и верхнефаменский (D_3 fm₂) водоносные комплексы. Все водоносные горизонты и комплексы, кроме неоген-четвертичного, являются хорошо защищёнными. Воды по химическому составу в основном гидрокарбонатные, кальциево-магниевые.

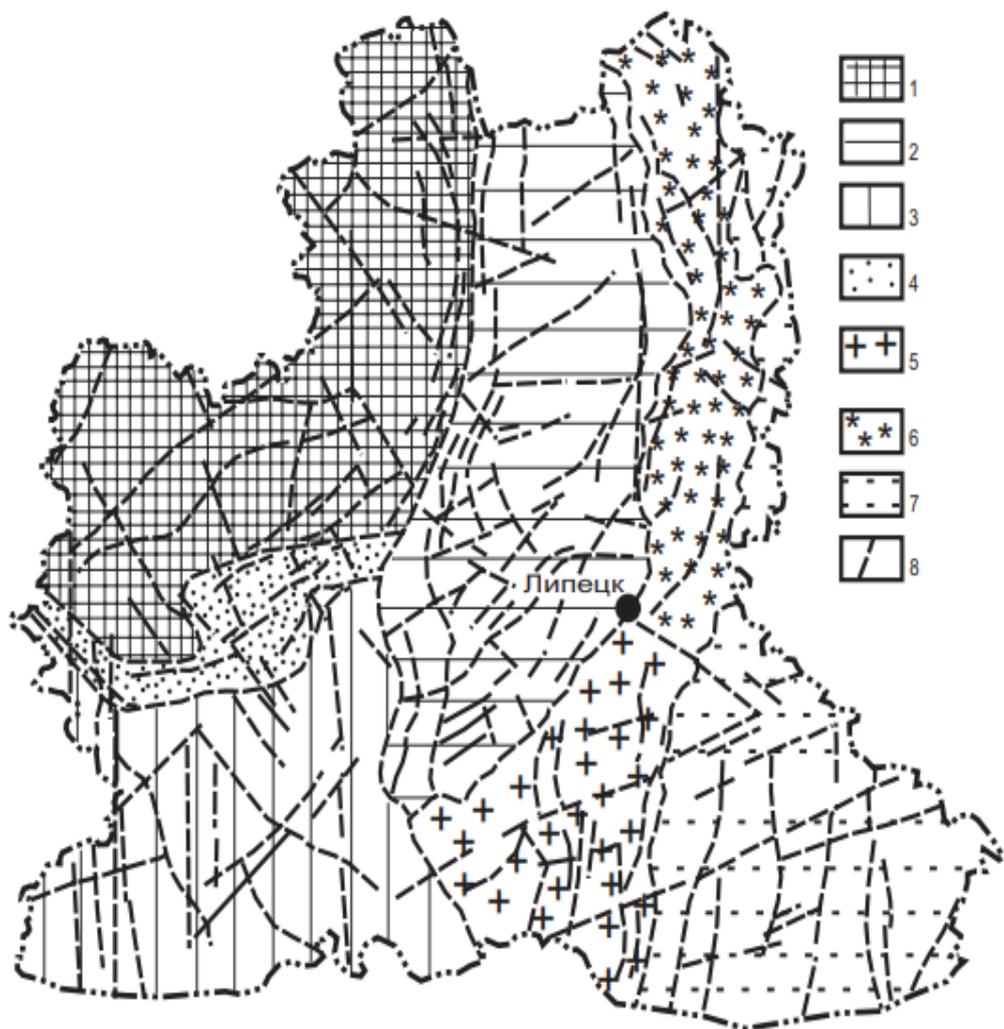


Рис. 1. Схема неотектонических структур Липецкой области. Структурные элементы в пределах Среднерусской возвышенности: 1 – Новосильское поднятие; 2 – Трубетчинская структурная терраса; 3 – Кшень-Оскольская структурная терраса; 4 – Елецко-Ливенский прогиб. Структурные элементы в пределах Окско-Донской низменности: 5 – Кривоборский прогиб; 6 – Салтыковский прогиб; 7 – Шукавкинское поднятие; 8 – осевые линии областей динамического влияния разломов фундамента

Fig. 1. Scheme of neotectonic structures of the Lipetsk region. Structural elements within the Central Russian Upland: 1 – Novosilskoe uplift; 2 – Trubetchinskaya structural terrace; 3 – Kshen-Oskolskaya structural terrace; 4 – Yelets-Livensky trough. Structural elements within the Oka-Don lowland: 5 – Krivobor trough; 6 – Saltykovsky trough; 7 – Shukavka uplift; 8 – axial lines of areas of dynamic influence of foundation faults



Объекты и методы исследования

Часть **Новосильского поднятия** располагается в северо-западной части Липецкой области. Высоты колеблются в диапазоне от 200 до 220 м, доходя до 240 м на некоторых локальных поднятиях. Потенциальная энергия рельефа на большей части варьируется от 40 до 60 м/км² и в некоторых местах достигает значений 80 м/км². Тектонические поднятия составляют в среднем +140 м, доходя до +150 м и +160 м на локальных поднятиях. Четвертичный комплекс представлен ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями, которые перекрыты лёссово-почвенными отложениями. Для западной части Новосильского поднятия характерно отсутствие морены, а водно-ледниковые отложения сформированы на высотах больше 220 м. Речные долины состоят из балочного аллювия и аллювия малых рек. Первый состоит из супесей и суглинков, второй – по большей части из глинистых песков. Отложения дочетвертичного возраста представлены тремя комплексами: верхнефаменским, нижнекаменноугольным-среднемеловым и нижнемеловым. В западной части поднятия каменноугольные и юрские отложения отсутствуют. Литогенетическая трещиноватость характеризуется субмеридиональной направленностью в восточной части и северо-западной – в западной. Наиболее всего на характер трещиноватости оказывают влияние девонские карбонатные породы (известняки и доломиты). Наибольшее динамическое воздействие фиксируется вдоль южной границы Новосильского поднятия и по долине Дона (восточная граница). Зона динамического воздействия имеет ширину от 5 до 10 км. Неотектоническое влияние зоны динамического воздействия выражается в формировании сбросов, которые характеризуются субширотными осями растяжения и субмеридиональными – сжатия. Таким образом, именно эти процессы объясняют расположение карстовых образований и положение оползневых стенок срыва в нижнекаменноугольном комплексе. Южнее Новосильского поднятия находится Елецко-Ливенский прогиб. Для границы этих двух структур характерны сбросы с правым сдвигом.

Трубетчинская структурная терраса расположена в центральной части Липецкой области восточнее Новосильского поднятия. Тектонические колебания на её территории достигают +75 м, а средняя высота составляет в среднем 200 м. Базис эрозии находится на абсолютной высоте 120–140 м. Потенциальная энергия колеблется в диапазоне от 25 до 45 м/км², локально увеличиваясь до 60 м/км². Энергия рельефа растёт за счёт расчленения рельефа в условиях слабых поднятий. Отложения в условиях междуречий характеризуется покровными суглинками (мощность 3–5 м), ниже которых залегает морена донского горизонта. Для северной части Трубетчинской террасы характерны те же комплексы дочетвертичных отложений, что и для Новосильского поднятия. Верхнефаменские отложения, характеризующиеся карбонатными породами, проявляются только в нижних частях разреза некоторых рек и оврагов. Второй ярус представлен глинами и мергелями преимущественно неокомского возраста. В некоторых местах ниже неокомских отложений залегают отложения юрского и каменноугольного возраста. На большей части территории террасы распространены песчаники и пески альбского и аптского возрастов, в которых встречаются линзы глин и крупнозернистых песчаников. Третий комплекс пород представлен неогеновым аллювием, а также верхнемиоценовыми песками на южной части террасы. Трещиноватости в основном имеют северо-западную, северо-восточную, а также субширотную (на севере террасы) направленность. Динамическое влияние разломов проявляется в формировании сбросов и сдвигов. Для сбросов характерна юго-восточная направленность, а в целом горизонтальное сжатие локальных тектонических напряжений имеет северо-восточную ориентировку.

Кшень-Оскольская структурная терраса занимает юго-запад Липецкой области. Тектонические колебания находятся в промежутке от +80 до +100 м. Наибольшие возвышенности имеют абсолютную высоту 200 м, а базис эрозии – 160 м. Потенциальная энергия доходит до 60 м/км² при средних значениях от 35 до 40 м/км². Рассматривая террасу в

контексте разреза четвертичных отложений, можно разделить её на западную и восточную часть. Западная часть сложена суглинками и лёссами, возраст которых варьируется в достаточно большом диапазоне. Осадконакопление восточной части связано с влиянием ледника. Над мореной донского горизонта, представленной суглинками и глинами, залегают покровные суглинки. Локально встречаются пески и песчаники флювиогляциального генезиса. Долины рек сложены аллювиальными отложениями преимущественно песчаного состава. Мощность этих отложений не превышает трёх метров. Дочетвертичные отложения также представлены тремя комплексами. Ниже всех залегает верхнедевонский комплекс, который сложен карбонатными породами. Выше залегающий комплекс сформирован преимущественно глинами и мергелями неокомского возраста. И самый верхний – сложен песками нижнего мела, а также песками и мергелями сеноманского и сантонского возрастов и неоген-палеогеновыми песками в западной части. Аллювий долин рек представлен песками верхнего плиоцена. Трещиноватость преимущественно имеет северо-западную и северо-восточную направленность. Тектонические разрывы направлены меридионально. Воздействие разломных зон выражено в виде трещиноватости сбросового типа, однако точные параметры этих явлений установить не удалось. Эти разломные зоны связаны с трещинами в кристаллическом фундаменте и имеют ширину от 1 до 2 км.

Елецко-Ливенский прогиб находится в западной части Липецкой области. Он располагается вдоль реки Сосна и ограничен Новосильским поднятием с севера и Кшень-Оскольской структурной террасой – с юга. Формирование прогиба связано с Рыльско-Елецкой зоной трещиноватости в докембрийском фундаменте. Тектонические колебания находятся в промежутке от +50 до +75 м. Максимальные высоты имеют абсолютные значения около 170 м, а базис эрозии приурочен к абсолютной высоте 130 м. Потенциальная энергия рельефа доходит до 75 м/км^2 при средних значениях от 35 до 55 м/км^2 . Четвертичные отложения междуречий представлены гляциальными и флювиогляциальными породами, выше которых залегают лёссово-почвенные отложения. Аллювиальные отложения р. Сосны представлены песчаными и суглинистыми породами. Из пород дочетвертичного возраста наибольшее распространение имеют карбонатные породы верхнефаменского возраста. Тектонические напряжения имеют субмеридиональную направленность. Зона трещиноватости фундамента обуславливает растяжения с левым сдвигом.

В восточной части Липецкой области находится северо-западное крыло Окско-Донской низменности. К низменности относятся следующие структуры, находящиеся на территории области: Кривоборский и Салтыковский прогибы, а также Шукавкинское поднятие.

Кривоборский и Салтыковский прогибы находятся в восточной и северо-восточной части Липецкой области, протягиваясь вдоль реки Дон. Амплитуда тектонических движений этих двух структур не превышает 0 м. Максимальные высоты имеют абсолютные значения около 200 м. Потенциальная энергия доходит до 80 м/км^2 при средних значениях от 40 до 60 м/км^2 . Четвертичный разрез представлен аллювиальными отложениями различного возраста, от эоплейстоцена и неоплейстоцена до голоцена, а также отложениями флювиогляциальными, которые относятся к донскому горизонту нижнего плейстоцена. Дочетвертичные отложения плавно переходят в четвертичные, представлены в основном песками. В некоторых местах девонские известняки перекрываются аллювием плиоценового возраста. Литогенетическая трещиноватость имеет северо-восточную направленность, что совпадает с ориентацией осей прогибов.

Шукавкинское поднятие занимает юго-восточную оконечность Липецкой области. Тектонические колебания находятся в промежутке от 0 до +25 м. Максимальные высоты имеют абсолютные значения около 160 м, а базис эрозии приурочен к абсолютной высоте 110 м. Максимальная потенциальная энергия рельефа составляет 35 м/км^2 при средних значениях около 5 м/км^2 в восточной части и 15 м/км^2 – в западной. Для восточной части поднятия характерно увеличивающееся вертикальное расчленение, в то время, как западная часть скорее характеризуется постепенным гипсометрическим усреднением



при увеличении высоты базиса эрозии и динамическом равновесии. В восточной части четвертичные отложения представлены мореной донского возраста, поверх которой залегают водно-ледниковые и ледниково-озёрные отложения, представленные глинами и мергелями. Ещё выше залегают покровные суглинки. Дочетвертичные отложения представлены плиоценовыми песками и глинами [Трегуб и др., 2008].

Геохимия бора в подземных водах во многом определяется его зависимостью от химического состава подземных вод и соотношений основных макрокомпонентов [Закутин, Вавичкин, 2010]. В качестве основы для исследований по изучению борного загрязнения подземных вод был проведен комплекс полевых эколого-гидрогеохимических работ, проанализирован водный кадастр Липецкой области. Было выявлено, что на территории Липецкой области зафиксировано 74 случая превышения ПДК по бору ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) в скважинах наблюдательной сети (рис. 2).

Пространственно повышенные концентрации бора были зафиксированы преимущественно в пределах структуры положительного знака – Среднерусской возвышенности в пределах Кшень-Оскольской структурной террасы. Также превышения бора в подземных водах отмечены в пределах Елецко-Ливенского, Кривоборского и Салтыковского прогибов.

На основе полученной информации в качестве объекта исследований была обозначена южная часть области. Полевые наблюдения и пробоотбор осуществлялся западнее и юго-западнее г. Задонска вдоль излучины реки Дон. Выбор был обусловлен достаточно высокой плотностью скважин с превышением ПДК по бору на относительно небольшой территории (около 200 км^2), а также высокой неотектонической активностью данного участка.

Результаты и их обсуждение

В 50 % отобранных проб были зафиксированы содержания бора, превышающие ПДК (рис. 2). Гидрогеохимические аномалии были сопоставлены с рисунком неотектонических нарушений. Для выделения линеаментов был использован набор контрастных SRTM снимков рельефа Липецкой области. Ярко выраженные на карте рельефа линейные структуры были сопоставлены с осевыми линиями областей динамического влияния разломов фундамента (см. рис. 1). В результате была создана геоинформационная модель, демонстрирующая взаимосвязь выявленных гидрогеохимических аномалий с неотектонической характеристикой района исследований (рис. 3)

В октябре 2021 г. было проведено дополнительное исследование химического состава загрязнённых подземных вод. Для обследования была выбрана реперная скважина, в которой ранее уже было обнаружено превышение ПДК бора. Скважина расположена в восточной части посёлка Локтево в 4,5 км западнее Задонска. Посёлок расположен на левом борту оврага, который спускается к Дону (рис. 4). Овраг имеет глубину около двадцати метров и ширину чуть более двухсот. Такой размер свидетельствует о величине проходящего в этом месте неотектонического нарушения.

Сухой остаток был отправлен в лабораторию для проведения спектрального атомно-эмиссионного химического анализа на расширенный список компонентов. Полученное массовое содержание компонентов было пересчитано с учётом изначального объёма воды и сопоставлено с нормативными лимитами для питьевой воды. Результаты лабораторных исследований представлены в таблице.

В пробе было обнаружено девять компонентов в объёме, превышающем минимальный предел измерения для прибора. Результаты химического анализа позволяют обозначить комплекс химических элементов, наполняющих подземные воды в местах активной разломной тектоники. В их числе бор, бериллий, кобальт, лантан, литий, молибден, стронций, титан, ванадий. Бериллий относится к веществам первого класса опасности. Кобальт, литий, бор, молибден и стронций по характеру токсичности отнесены ко второму классу опасности.

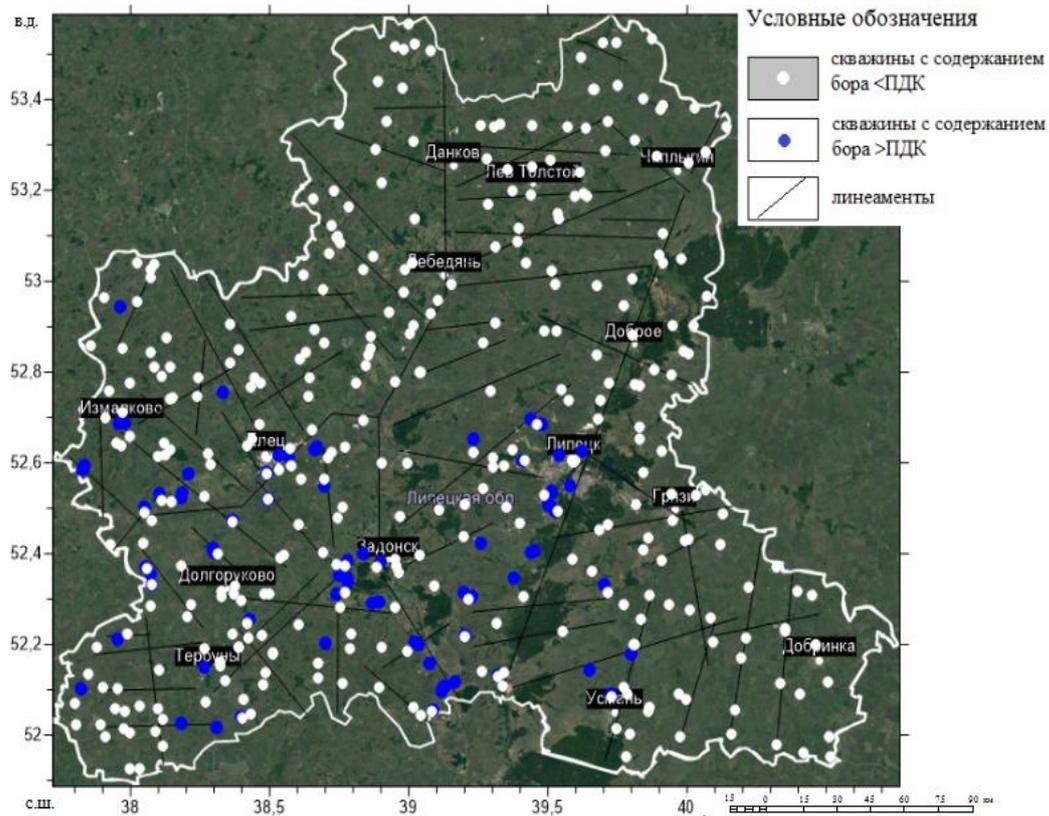


Рис. 2. Эколого-гидрогеохимическая карта содержания бора в подземных водах Липецкой области
Fig. 2. Ecological and hydrogeochemical map of boron content in groundwater of the Lipetsk region

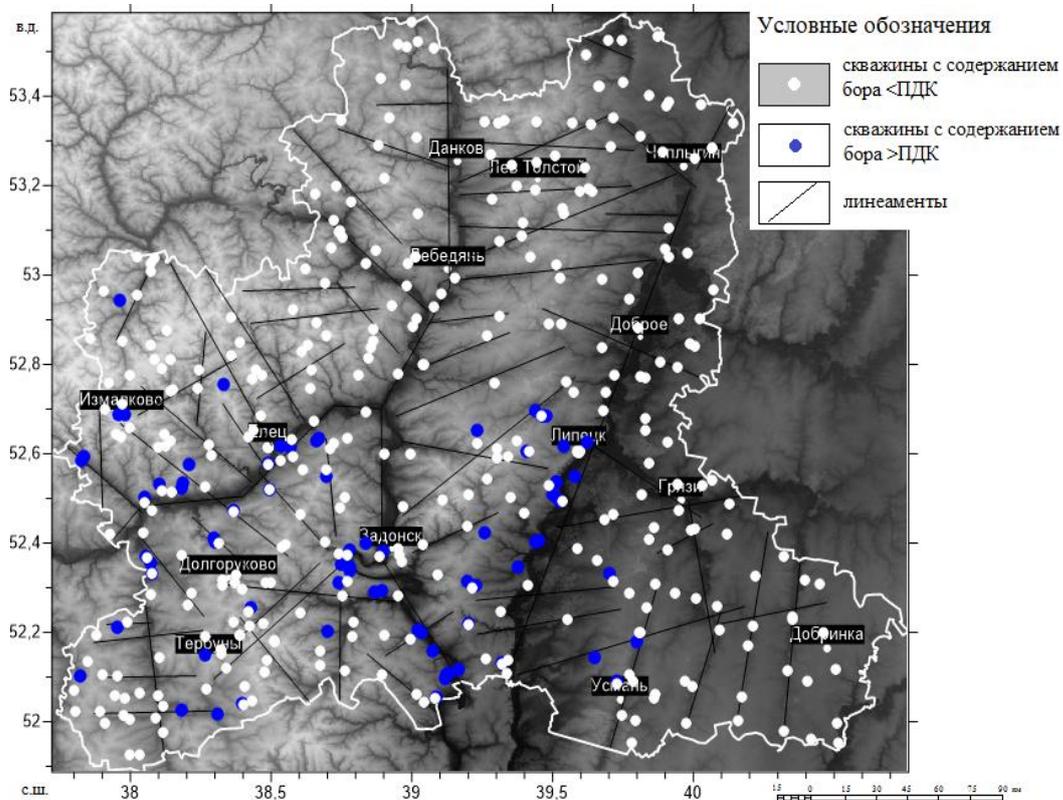


Рис. 3. Геоинформационная модель эколого-гидрогеохимических аномалий бора на территории Липецкой области
Fig. 3. Geoinformation model of ecological and hydrogeochemical anomalies of boron in the territory of the Lipetsk region

Содержание тяжелых металлов в подземных водах, приуроченных к разломной зоне
 The content of heavy metals in groundwater confined to the fault zone

Показатели	B	Be	Co	La*	Li*	Mo	Sr	Ti*	V
ПДК, мг/л	0,5	0,0002	0,10	0,002	0,7	0,25	7,00	0,1	0,10
Концентрация в пробе, мг/л	7,4	0,07	0,06	1,24	0,7	0,01	10,6	1,2	0,02

*В отечественном СанПин отсутствуют эти элементы, лимитирующие значения взяты из зарубежных нормативных документов и научных исследований.

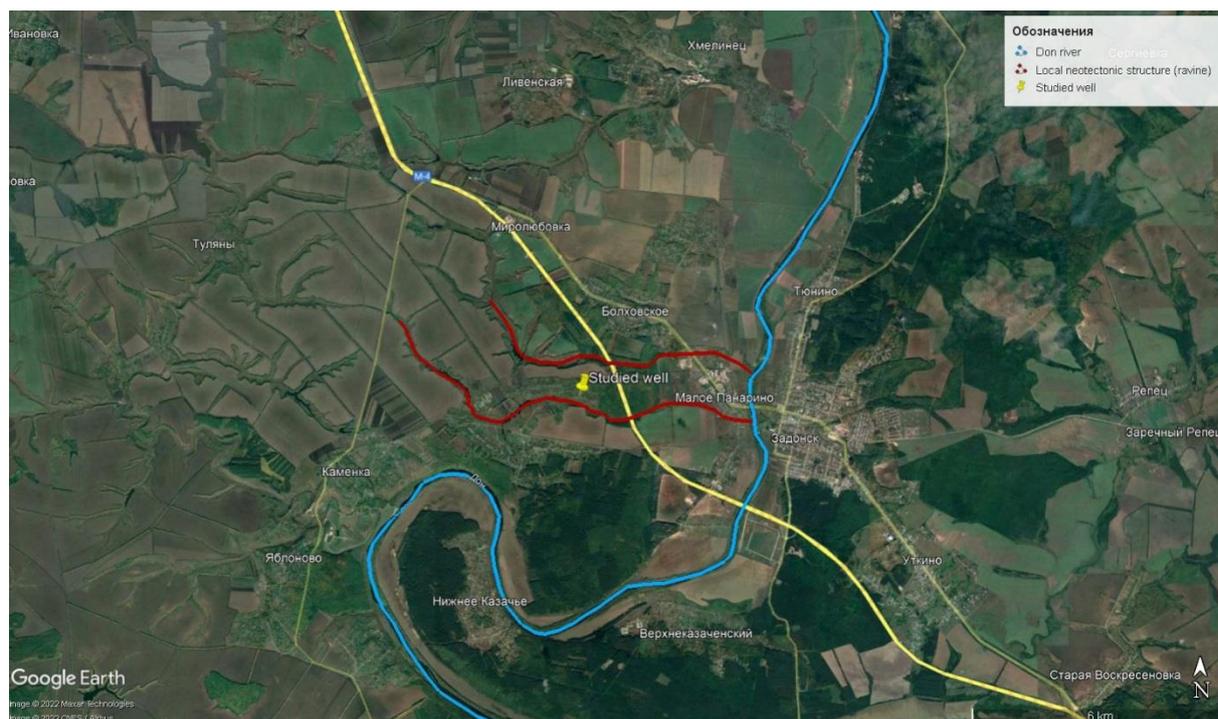


Рис. 4. Местоположение маркерной скважины
 Fig. 4. Location of the marker well

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие обобщения:

– максимальные превышения зафиксированы для лантана и бериллия. Для лантана зафиксированы превышения относительно ПДК более чем в 1000 раз. Свойством лантана является его активная способность образовывать токсические соединения. В частности, нитрат лантана – сильный окислитель, образует едкое вещество, токсичное при проглатывании, пожароопасное. Бериллий отнесен к 1 классу опасности, его концентрации превышают ПДК в 300 раз. В растворенном виде он оказывает аллергическое, канцерогенное, общетоксическое действие. Бериллий является мутагенным элементом, взаимодействует с ДНК, вызывает генные трансформации.

– бор и титан превышают ПДК в 10–15 раз. Механизм влияния титана на организм изучен плохо. Возможно его проникновение при имплантации, однако он не является активным. Дефицит бора меняет интенсивность мозговых импульсов, а его повышенные концентрации оказывает негативное воздействие на репродуктивные органы.

– молибден и стронций обнаружены в концентрациях, превышающих ПДК в несколько раз.

Подобные превышения ряда металлов и металлоидов свидетельствуют об активной тектонической деятельности, способствующей эманациям обозначенных элементов в газовой и растворенной формах. Эколого-гидрогеохимические исследования, проведенные в

пределах области, выявили приуроченности повышенных концентраций бора к подземным водам, расположенным в пределах локальных линейных неотектонических структур (линеаментов). При этом большая часть таких скважин сконцентрирована вблизи самых крупных рек Липецкой области, а именно Дона, Воронежа и Сосны (см. рис. 2). Следует учитывать, что указанные реки протекают по разломным нарушениям, ограничивающим локальные неотектонические структуры [Лукиянов, Трегуб, 2006]. Река Воронеж разделяет Трубетчинскую структурную террасу и Салтыковский прогиб. Сосна протекает по тектонически ослабленной зоне Елецко-Ливенского прогиба. Дон является естественной границей между Среднерусской возвышенностью и Окско-Донской низменностью [Трегуб, 2006]. Аналогичная ситуация с превышением бора в скважинах также зафиксирована в пределах Среднего Дона на территории Воронежской области. Следует подчеркнуть, что наличие бора не связано с каким-либо техногенным воздействием. Гидрогеохимия бора в девонских отложениях формируется с восходящими потоками высокоминерализованных подземных вод, поднимающихся из более глубоко расположенных водоносных горизонтов по зонам крупных разломов и ослабленным трещиноватым зонам, связанным с локальной неотектонической активностью.

При этом наиболее явно борное загрязнение проявляет себя в скважинах девонского возраста, по большей части в наиболее глубоком евланово-ливенском водоносном комплексе. На юге области имеют место единичные скважины с превышениями бора, эксплуатирующие неоген-четвертичный водоносный горизонт, однако в целом бор проявляется в глубоких (около и более 100 м) скважинах.

При этом присутствует ряд факторов, которые осложняют ситуацию и увеличивают риски для населения. Среди них: недостаточная изученность воздействия бора на организм, сложность в очистке воды от бора, а также сам факт уникальности этого компонента для данного региона, чья основная деятельность связана с горнодобывающей, перерабатывающей промышленностью, сельским хозяйством. Следует также учитывать, что в данном случае бор является лишь одним из индикаторов процесса, связанного с неотектонической деятельностью в регионе. Помимо бора в исследуемой воде обнаружены бериллий, лантан, литий, стронций и титан в количествах, превышающих предельно допустимые.

Заключение

В качестве выводов по проведенной работе следует отметить следующее:

1. Тектоническая и неотектоническая деятельность в пределах платформ является активным фактором преобразования компонентов геологической среды. Разломная тектоника формирует особенности рельефа платформ, ведет к развитию экзогенных и инженерно-геологических процессов и явлений.

2. Глубинная неотектоническая деятельность проявляется в присутствии в подземных водах комплекса металлов и металлоидов, среди которых бериллий, лантан, титан, молибден, стронций. Бор является маркирующим элементом, свидетельствующим о природном происхождении эколого-гидрогеохимической аномалии неотектонического происхождения.

3. Геоинформационное моделирование территории Липецкой области продемонстрировало взаимосвязь выявленных эколого-гидрогеохимических аномалий с неотектонической характеристикой района исследований. Глубинное поступление химических элементов, включая бор, в подземные воды приурочено к областям активной неотектонической деятельности в пределах Липецкой и Воронежской областей, относящихся к Восточно-Европейской платформе. Комплексное картирование данных процессов является важным фактором при принятии решений о определении зон воздействия горнодобывающих объектов Липецкой области на водоносные горизонты и комплексы.



Список литературы

- Бочаров В.Л. 2009. Ландшафтно-экологические условия и гидрогеохимия бассейна Среднего Дона. Статья 2. Факторы формирования, гидрогеохимия и экологическая оценка подземных вод. Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Геология, 1: 134–141.
- Бочаров В.Л., Колесова Д.А. 2017. Гидрогеохимия пресных подземных вод и рассолов Новохопёрского никеленосного Района (Воронежский кристаллический массив). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 3: 111–115.
- Голик В.И., Полухин О.Н., Петин А.Н., Комащенко В.И. 2013. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА. Горный журнал, 4: 91–94.
- Закутин В.П., Вавичкин А.Ю. 2010. Основные особенности геохимии бора в пресных подземных водах. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 1: 30–39.
- Закутин В.П., Голицын М.С., Швец В.М. 2012. Актуальные проблемы изучения и оценки качества подземных питьевых вод. Водные ресурсы, 39 (5): 485–495.
- Корнилов А.Г., Дроздова Е.А., Добровольская О.А. 2015. Современная геохимическая ситуация в районе с интенсивной горнодобывающей деятельностью КМА. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 9 (206): 147–153.
- Косинова И.И., Силкин К.Ю., Лепендин Д.Г. 2020. Неотектонический анализ территории Липецкой области как способ прогнозирования борного загрязнения подземных вод. В кн.: Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горнопромышленных регионов. Материалы Международной научно-практической конференции, 17–19 ноября 2020, Воронеж, Истоки: 144–148.
- Косинова И.И., Ляпин Р.А. 2020. Система экологического менеджмента состояния неоген-четвертичного и верхнедевонского водоносных комплексов территории Липецкой области. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 2: 83–89. DOI: 10.17308/geology.2020.2/2862.
- Косинова И.И., Ильяш В.В., Косинов А.Е. 2006. Эколого-геологический мониторинг техногенно нагруженных территорий. Воронеж, Воронежский государственный университет, 103 с.
- Кравчук Т.Н., Сергеев С.В. 2012. Прогноз загрязнения подземных вод при разработке железорудных месторождений КМА методами численного моделирования. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 15 (134): 168–172.
- Лисецкий Ф.Н., Чендев Ю.Г., Голушов П.В., Чепелев О.А. 2004. Загрязнение почвы тяжелыми металлами в зоне Курской магнитной аномалии. Научные труды Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, 10: 286–291.
- Лукьянов В.Ф., Трегуб А.И. 2006. Девонская рифтогенная зона в пределах Воронежской антеклизы и ее проявление в подстилающих и перекрывающих структурно-вещественных комплексах. В кн.: Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII международной конференции, 18–23 сентября 2006, Воронеж, Воронежский государственный университет, Т. 1: 299–302.
- Новиков Д.А. 2014. Гидрогеохимия и механизмы формирования состава подземных вод Арктических районов Сибири. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2 (1): 109–114.
- Силин И.И. 2007. Природно-техногенные гидрогеохимические аномалии вблизи промышленных центров (на примере г. Обнинск Калужской области). Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 6: 518–530.
- Трегуб А.И. 2006. Карта новейшей тектоники территории Воронежского кристаллического массива. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 1: 5–16.
- Трегуб А.И., Корабельников Н.А., Трегуб С.А., Старухин А.А. 2008. Территориальный прогноз развития опасных экзогенных геологических процессов в Липецкой области. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 1: 147–152.
- Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Чаплыгин Н.Н., Котенко Е.А. 2004. КМА: долговременное и экологически сбалансированное недропользование. Горный журнал, 1: 4–9.
- Al-Hilal M. 2016. Establishing the range of background for radon variations in groundwater along the Serghaya fault in southwestern Syria. Geofisica Internacional, 55 (4): 255–266. DOI: 10.19155/geofint.2016.055.4.3.

- Coxito Afonso M.J. 2003. Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal). *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 28: 173–192.
- Dragovic R., Dordevic M., Martic-Bursac N., Dragovic S., Jankovic-Mandic L., Radivojevic A., Filipovic I. 2014. Groundwater in Serbia: Resources, environmental impacts and sustainable management. In: *Groundwater: Hydrogeochemistry, Environmental Impacts and Management Practices*. New York, Nova Science Publishers: 95–112.
- Eliopoulos D.G., Economou-Eliopoulos M., Apostolikas A., Golightly J.P. 2012. Geochemical features of nickel-laterite deposits from the Balkan Peninsula and Gordes, Turkey: The genetic and environmental significance of arsenic. *Ore Geology Reviews*, 48: 413–427. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2012.05.008.
- Katsanou K., Siavalas G., Lambrakis N. 2012. The thermal and mineral springs of Aitolokarnania Prefecture: Function mechanism and origin of groundwater. *Environmental Earth Sciences*, 65 (8): 2351–2364. DOI: 10.1007/s12665-011-1451-8.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Zaitseva I.S. 2020. Environmental and Economic Indicators of Anthropogenic Impacts on Water Resources in Russia and the World. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 90 (4): 428–436. DOI: 10.1134/S1019331620040103.
- Schyns J.F., Hoekstra A.Y., Booij M.J., Hogeboom R.J., Mekonnen M.M. 2019. Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (11): 4893–4898. DOI: 10.1073/pnas.1817380116.
- Siddique J., Menggui J., Shah M.H., Shahab A., Rehman F., Rasool U. 2020. Integrated Approach to Hydrogeochemical Appraisal and Quality Assessment of Groundwater from Sargodha District, Pakistan. *Geofluids*, 2020: 6621038. DOI: 10.1155/2020/6621038.
- Thach N.N., Hai P.N., Lam N.V., Thuy D.T.T. 2010. Application of multimedia technology with remote sensing, GPS and GIS for Discovering karst ground water in Haging Province. 31st Asian Conference on Remote Sensing 2010, ACRS 2010: 1265–1273.
- Zhiltsov S.S., Zonn I.S., Semenov A.V., Grishin O.E., Markova E.A. 2020. Role of water resources in the modern world. *Handbook of Environmental Chemistry*, 105: 13–29. DOI: 10.1007/978-3-642-0598-5_598.
- Zoran M.A., Savastru R.S., Savastru D.M., Serban F.S., Teleaga D.M., Mateciuc D.N. 2017. Surface deformation analysis over Vrancea seismogenic area through radar and GPS geospatial data. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 10428: 1042817. DOI: 10.1117/12.2278012.

References

- Bocharov V.L. 2009. Landscape-Ecological Conditions and Hydrogeochemistry of Average Don Pool. Article II. Factors of Formation, Hydrogeochemistry and Ecological Estimation of Underground Waters. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1: 134–141 (in Russian).
- Bocharov V.L., Kolesova D.A. 2017. Hydrogeochemistry of Fresh Underground Waters and Brines Nickel Novokhoperskogo Rajjona (Voronezh Crystalline Massif). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 3: 111–115 (in Russian).
- Golik V.I., Polukhin O.N., Petin A.N., Komashchenko V.I. 2013. *Ekologicheskiye problemy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy KMA* [Environmental problems of development of ore deposits of KMA]. *Gornyy zhurnal*, 4: 91–94.
- Zakutin V.P., Vavichkin A.Yu. 2010. The Main Geochemical Speciecs of Boron in Fresh Groundwater. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*, 1: 30–39 (in Russian).
- Zakutin V.P., Golitsyn M.S., Shvets V.M. 2012. Aktualnyye problemy izucheniya i otsenki kachestva podzemnykh pityevykh vod [Actual problems of studying and assessing the quality of underground drinking water]. *Vodnyye resursy*, 39 (5): 485–495.
- Kornilov A.G., Drozdova E.A., Dobrovolskaya O.A. 2015. Modern Geochemical Conditions in Regions with Intensive Mining Activities of KMA. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 9 (206): 147–153 (in Russian).
- Kosinova I.I., Silkin K.Y., Lependin D.G. 2020. Neotectonic Analysis of Lipetsk Region as a Way to Predict Ground Water's Contamination by Boron. In: *Patterns of transformation of ecological functions of the geosphere of large mining regions. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 17–19 November 2020, Voronezh, Publ, Istoki: 144–148 (in Russian).



- Kosinova I.I., Lyapin R.A. 2020. The environmental management system of the Neogene-Quaternary and Upper Devonian aquifers in the Lipetsk region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2: 83–89 (in Russian). DOI: 10.17308/geology.2020.2/2862.
- Kosinova I.I., Iliash V.V., Kosinov A.E. 2006. *Ekologo-geologicheskii monitoring tekhnogenno nagruzhennykh territoriy* [Ecological and geological monitoring of technogenically loaded territories]. Voronezh, Publ. Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 103 p.
- Kravchuk T.N., Sergeev S.V. 2012. Undergroundwaters Contaminationforecast for Iron Ore Development of KMA by Methods of Numerical Simulation. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 15 (134): 168–172.
- Lisetskii F.N., Chendev Yu.G., Goleusov P.V., Chepelev O.A. 2004. Zagryazneniye pochvy tyazhelymi metallami v zone Kurskoy magnitnoy anomalii [Soil contamination with heavy metals in the zone of the Kursk magnetic anomaly]. *Nauchnyye trudy Federalnogo nauchnogo tsentra gigiyeny im. F.F. Erismana*, 10: 286–291.
- Lukianov V.F., Tregub A.I. 2006. Devonskaya riftogennaya zona v predelakh Voronezhskoy anteklizy i eye proyavleniye v podstilayushchikh i perekryvayushchikh strukturno-veshchestvennykh kompleksakh [Devonian rift zone within the Voronezh antecline and its manifestation in the underlying and overlying structural-material complexes]. In: *Aktivnyye geologicheskiye i geofizicheskiye protsessy v litosfere. Metody, sredstva i rezultaty izucheniya* [Active geological and geophysical processes in the lithosphere. Methods, means and results of the study]. *Proceedings of the XII International Conference*, 18–23 September 2006, Voronezh, Publ. Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, V. 1: 299–302.
- Novikov D.A. 2014. Hydrogeochemistry and Mechanisms of Groundwater Formation in Siberian Arctic. *Interexpo GEO-Siberia*, 2 (1): 109–114 (in Russian).
- Silin I.I. 2007. Prirodno-tekhnogennyye gidrogeokhimicheskiye anomalii vblizi promyshlennykh tsentrov (na primere g. Obninsk Kaluzhskoy oblasti) [Natural and technogenic hydrogeochemical anomalies near industrial centers (on the example of the city of Obninsk, Kaluga region)]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 6: 518–530.
- Tregub A.I. 2006. The Recent Tectonic Map of the Voronezh Crystalline Massif. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1: 5–16 (in Russian).
- Tregub A.I., Korabelnikov N.A., Tregub S.A., Staruchin A.A. 2008. Territorial Prognosis of Development of Dangerous Exogenous Processes in the Lipeck Area. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1: 147–152 (in Russian).
- Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Chaplygin N.N., Kotenko E.A. 2004. KMA: dolgovremennoye i ekologicheskii sbalansirovannoye nedropolzovaniye [KMA: long-term and environmentally balanced subsoil use]. *Gornyy zhurnal*, 1: 4–9.
- Al-Hilal M. 2016. Establishing the range of background for radon variations in groundwater along the Serghaya fault in southwestern Syria. *Geofisica Internacional*, 55 (4): 255–266. DOI: 10.19155/geofint.2016.055.4.3.
- Coxito Afonso M.J. 2003. Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal). *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 28: 173–192.
- Dragovic R., Dordevic M., Martic-Bursac N., Dragovic S., Jankovic-Mandic L., Radivojevic A., Filipovic I. 2014. Groundwater in Serbia: Resources, environmental impacts and sustainable management. In: *Groundwater: Hydrogeochemistry, Environmental Impacts and Management Practices*. New York, Nova Science Publishers: 95–112.
- Eliopoulos D.G., Economou-Eliopoulos M., Apostolikas A., Golightly J.P. 2012. Geochemical features of nickel-laterite deposits from the Balkan Peninsula and Gordes, Turkey: The genetic and environmental significance of arsenic. *Ore Geology Reviews*, 48: 413–427. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2012.05.008.
- Katsanou K., Siavalas G., Lambrakis N. 2012. The thermal and mineral springs of Aitolokarnania Prefecture: Function mechanism and origin of groundwater. *Environmental Earth Sciences*, 65 (8): 2351–2364. DOI: 10.1007/s12665-011-1451-8.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Zaitseva I.S. 2020. Environmental and Economic Indicators of Anthropogenic Impacts on Water Resources in Russia and the World. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 90 (4): 428–436. DOI: 10.1134/S1019331620040103.

- Schyns J.F., Hoekstra A.Y., Booij M.J., Hogeboom R.J., Mekonnen M.M. 2019. Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (11): 4893–4898. DOI: 10.1073/pnas.1817380116.
- Siddique J., Menggui J., Shah M.H., Shahab A., Rehman F., Rasool U. 2020. Integrated Approach to Hydrogeochemical Appraisal and Quality Assessment of Groundwater from Sargodha District, Pakistan. *Geofluids*, 2020: 6621038. DOI: 10.1155/2020/6621038.
- Thach N.N., Hai P.N., Lam N.V., Thuy D.T.T. 2010. Application of multimedia technology with remote sensing, GPS and GIS for Discovering karst ground water in Haging Province. 31st Asian Conference on Remote Sensing 2010, ACRS 2010: 1265–1273.
- Zhiltsov S.S., Zonn I.S., Semenov A.V., Grishin O.E., Markova E.A. 2020. Role of water resources in the modern world. *Handbook of Environmental Chemistry*, 105: 13–29. DOI: 10.1007/978-3-030-598-598_598.
- Zoran M.A., Savastru R.S., Savastru D.M., Serban F.S., Teleaga D.M., Mateciuc D.N. 2017. Surface deformation analysis over Vrancea seismogenic area through radar and GPS geospatial data. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 10428: 1042817. DOI: 10.1117/12.2278012.

*Поступила в редакцию 22.02.2022;
поступила после рецензирования 14.03.2022;
принята к публикации 25.03.2022*

*Received February 22, 2022;
Revised March 14, 2022;
Accepted March 25, 2022*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бударина Виктория Александровна, кандидат юридических наук, доцент кафедры экологической геологии геологического факультета, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Косинова Ирина Ивановна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующая кафедрой экологической геологии геологического факультета, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Лепендин Денис Геннадьевич, аспирант кафедры экологической геологии геологического факультета, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria A. Budarina, Candidate of Law, Associate Professor of the Department of Environmental Geology, Geological Faculty of the Voronezh State University, Voronezh, Russia

Irina I. Kosinova, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Geology of the Geological Faculty of the Voronezh State University, Voronezh, Russia

Denis G. Lependin, Postgraduate Student of the Department of Environmental Geology, Faculty of Geology, Voronezh State University, Voronezh, Russia