

УДК 550.462: 551.577

ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНЫХ
ОСАДКОВ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ
(НА ПРИМЕРЕ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ)

© 2025 г. Т. М. Кудерина¹, *, С. Б. Суслова¹, О. В. Кайданова¹, Г. С. Шилькрот¹,
В. Н. Лунин¹, А. В. Кудиков¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: kuderina@igras.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 14.09.2024 г.

Принята к публикации 28.12.2024 г.

Обсуждаются результаты многолетнего геохимического мониторинга атмосферных осадков, выпадающих на территории Курской биосферной станции Института географии РАН, ландшафты которой имеют статус фоновых. Изучение химического состава снежного покрова проводится с 2013 г., приземных аэрозолей – с 2015 г., дождевых осадков – с 2017 г. В снеговых и дождевых водах измерялись pH и минерализация; геохимический состав атмосферных осадков и аэрозолей определялся методами ICP-MS и ICP-AES. Динамика геохимического состава снежного покрова рассмотрена на основе выделения рядов химических элементов, концентрации которых в снеге возрастают. Для аэрозолей и дождевых осадков рассчитывались коэффициенты концентрации, позволяющие выявить интенсивность накопления химических элементов. Анализ динамики геохимического состава дождевых осадков проводился на основе расчетов коэффициентов превышения для каждого года изучения и с учетом движения воздушных масс. За период исследований в снежном покрове, приземных аэрозолях и дождевых осадках установлено увеличение содержаний Na, Ca, Ti, Cd, Ni, Zn, Pb, Cu, Sb, Co, La, Mo, Sr, Li, Sn, W, Hg, S, Ag, Bi, Cr. Спектр химических элементов, обнаруженных в атмосферных осадках, свидетельствует о влиянии на геохимический состав осадков региональных и трансграничных атмосферных потоков. Максимальные содержаниями Ni, Pb, Li, Sn, W наблюдались при преобладающем западном переносе воздушных масс. С юго-восточными вторжениями связаны высокие содержания Zn, Cu, Ag. Содержания в атмосферных осадках Cd, Ni, Zn, Pb, присутствующих в выбросах предприятий г. Курска, связаны с воздушными массами, приходящими с севера. Расчеты показали, что заметное увеличение содержания химических элементов в аэрозолях и дождях наблюдается в мае и августе–сентябре и обусловлено ростом запыленности атмосферы во время проведения сельскохозяйственных работ. Исследования осенне-зимнего периода выявили повышенные концентрации S и Sr, вероятно, связанное с отопительным периодом, а также с дальним переносом солей и частиц пыли.

Ключевые слова: химические элементы, коэффициент концентрации, дождевые осадки, снежный покров, приземные аэрозоли, воздушные массы, трансграничный перенос

DOI: 10.31857/S2587556625020108

ВВЕДЕНИЕ

Текущее десятилетие Генеральная Ассамблея ООН провозгласила Десятилетием восстановления экосистем (2021–2030 гг.)¹ и определила вызовы, требующие пристального внимания. Пер-

воочередными среди них являются адаптация к изменению климата и глобальное потепление, борьба с опустыниванием и деградацией земель, загрязнение окружающей среды, снижение биоразнообразия, дефицит воды и исчерпание природных ресурсов. Для многих регионов России с уязвимыми экосистемами вышеупомянутые проблемы весьма актуальны. Особенно эти проблемы проявляются на Европейской терри-

¹ <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/recreate-re-imagine-restore-un-decade-ecosystem-restoration-kicks> (дата обращения 15.01.2025).

тории России (ЕТР) в переходных ландшафтных зонах.

Ландшафтно-геохимические исследования позволяют определить особенности современного функционирования экосистем, выявить климатическое и антропогенное влияние на них, а также дать эколого-геохимическую оценку состояния компонентов природных и антропогенных ландшафтов. Для лесостепных ландшафтов в условиях потепления климата и увеличения деградации земель лимитирующим функционирование ландшафтов компонентом, имеющим большое экологическое значение, является водная составляющая. Основная часть в ней принадлежит атмосферным осадкам, которые могут выступать в качестве национальных индикаторов динамики происходящих в ландшафтах процессов (Лобковский и др., 2020; Kuderina et al., 2020).

Наблюдаемое в последние годы усиление аридизации климата, способствующее иссушению поверхности почв, приводит к увеличению природной эмиссии химических элементов (ХЭ) в атмосферу и вовлечению их в миграционные процессы с воздушными массами (ВМ). Изменениям в сторону расширения спектра ХЭ и увеличения их содержаний в химическом составе осадков способствуют также антропогенные выбросы веществ в атмосферу, приводящие к загрязнению ландшафтов. Таким образом, атмосферные осадки могут вносить значительный вклад в поступление ХЭ в лесостепные ландшафтно-геохимические системы (ЛГС).

Лесостепная зона ЕТР с черноземными почвами является житницей России. Природные ландшафты занимают около 5% территории, основные площади заняты агроценозами. Для таких регионов как Курская область, где большую часть земельного фонда составляют земли сельскохозяйственного назначения (81.3%), среди которых пашня занимает 64.8% земель (Доклад ..., 2021), очень важна оценка геохимического состава осадков, поступающих в почвы, и изучение его динамики.

В настоящее время за геохимическим составом атмосферных осадков ведут наблюдение российские сети станций комплексного фонового мониторинга (СКФМ), сети станций Глобальной службы наблюдения за атмосферой (ГСА). Также приняты российские и международные программы, созданы группы наблюдений, в задачи которых входит контроль за содержанием в атмосферных осадках и воздухе загрязняющих веществ при межрегиональном и трансграничном переносе. Среди них наиболее известной и действующей является “Совместная программа наблюдения и оценки распространения

загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе” — ЕМЕП (EMEP)². Однако измерения и анализ загрязняющих веществ в осадках на СКФМ, ГСА и других станциях, работающих по программам мониторинга, проводятся для ограниченного набора ХЭ и соединений (Еремина, 2019; Робертус и др., 2016; Топчая и др., 2021; Garmo et al., 2014; Kondrat'ev et al., 2013). Именно поэтому актуальны исследования, рассматривающие широкий спектр ХЭ в составе атмосферных осадков (Баранов и др., 2020; Власов, Еремина, 2020; Коробка и др., 2014; Кудерина и др., 2018).

Многолетние ландшафтно-геохимические исследования и наблюдения за динамикой экосистем проводятся по программе экологического мониторинга в лесостепной зоне на Курской биосферной станции (КБС) Институт географии РАН (ИГ РАН). В качестве фоновых рассматриваются природные ландшафты КБС, где с начала 1960-х годов не осуществляется хозяйственная деятельность (Кайданова и др., 2020; Кудерина и др., 2018).

Целью наших экспериментальных исследований является изучение геохимического состава атмосферных осадков, поступивших в лесостепные ландшафты КБС ИГ РАН в 2013–2024 гг. Объектами исследований выступают дождевые осадки в теплый период, годовой снежный покров и приземные аэрозоли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение в фоновых ландшафтах КБС химического состава снежного покрова осуществляется с 2013 г., приземных аэрозолей — с 2015 г., дождевых осадков — с 2017 г.

Отбор проб снежного покрова проводился в конце зимнего периода на ключевых точках наблюдения (ковыльная степь, широколиственный лес) и в ходе маршрутных исследований. Для проведения сравнительного анализа пробы снега отбирались в Курске вблизи Курского аккумуляторного завода (КАЗа), около автомагистралей и на сельскохозяйственных полях. Пробы снега отбирались в колонке 10 × 10 см по всей ее толще в стерильную тару, проводилось описание снежных шурфов, фиксировались мощность снежного покрова, степень покрытия территории.

Аспирационный отбор проб приземного аэрозоля лесостепных ландшафтов проводился аэрозольным комплексом ИФА³ РАН-ИГ

² ЕМЕП — Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe.

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

РАН на фильтры АФА-ХА 20 для выявления аэральной составляющей в период максимального снегонакопления и в период активного землепользования (май–сентябрь). Измерения проводились на ключевых точках наблюдения КБС, в агроландшафтах и на участке Центрально-Черноземного заповедника (ЦЧЗ)⁴, расположенного в 7 км севернее от КБС. Коэффициенты аэрозольной концентрации, рассчитанные по формуле:

$$K_1 = \frac{C}{\text{Кларк}}, \quad (1)$$

где C – содержание ХЭ в пробе, Кларк – кларк земной коры (Виноградов, 2021), позволили определить интенсивность накопления элементов в атмосферном аэрозоле фоновых ландшафтов. Для выявления реального привноса вещества с аэрозолями в ландшафты КБС коэффициенты аэрозольной концентрации ХЭ рассчитывались также относительно их содержаний в черноземных почвах КБС.

Особое внимание уделялось исследованиям дождевых атмосферных осадков, поступающих в природные ландшафты, как основному источнику доступной влаги в ЛГС лесостепей. Из-за неравномерного годового и сезонного распределения осадков отбор проб проводился при наличии эффективных осадков (>5 мм). Отбор проб осуществлялся в осадкомер, установленный на высоте 2 м над почвой в автономной позиции на открытом участке территории, занятой степной растительностью.

В полевых условиях проводилось определение показателя pH и минерализации (мг/л) в пробах дождевых и снеговых вод методом экспресс-анализа с помощью портативных pH-метра и кондуктометра фирмы Hanna Combo HI 98129. Подготовка проб для анализов осуществлялась в соответствии с нормативными документами (РД 52.04.186-89. Руководство ..., 2006).

Химический анализ проб аэрозолей и вод выполнен в аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Определение элементного состава в пробах проводили по методике (НСАМ №520-АЭС/МС, 2017) методами атомно-эмиссионной спектрометрии (прибор iCAP-6500 Duo, Thermo Scientific, США) и масс-спектрометрии (прибор X Series 2, Thermo Elemental, США) с индуктивно связанный плазмой. Проведено определение 71 химического элемента.

⁴ На территории ЦЧЗ установлена пожарная вышка, выбранная в качестве ключевой точки для измерения тонкодисперсного аэрозоля.

Согласно экогеохимической систематике, химические элементы рассмотрены по масштабам воздействия на окружающую среду и в зависимости от распространения в природе: элементы глобального значения: макроэлементы – содержание в литосфере $> 0.01\%$; элементы регионального и локального значения: микроэлементы (в том числе тяжелые металлы, лантаноиды) – содержание в литосфере $< 0.01\%$ (Иванов, 1994).

Основным реперным годом для исследования жидких атмосферных осадков, выпадающих на КБС, выбран 2020 г., так как в этот период была снижена антропогенная деятельность из-за COVID-19. Для анализа использованы данные 21 проб, отобранные в период апрель–ноябрь (все значимые дождевые осадки). Содержание ХЭ в дождевых осадках изучалось с учетом направления движения воздушных масс и фактических метеоданных в день отбора проб, фиксируемых автоматической метеостанцией КБС – Davis Instruments Vantage Pro 2.

Были рассчитаны коэффициенты концентрации (K_2) химических элементов относительно минимальных значений:

$$K_2 = \frac{\bar{c}}{c_{\min}}, \quad (2)$$

где \bar{c} – средняя концентрация ХЭ в осадках при ветрах основных румбов: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ, c_{\min} – минимальное содержание этого элемента в дождевых осадках. Минимальные содержания большинства ХЭ в осадках в период наших наблюдений были зафиксированы в пробах, отобранных после сильных ливней 14–16 июля 2020 г., когда выпало максимальное количество осадков. Влага передовой воздушной массы промыла атмосферу. Последующие дожди отличались минимальными концентрациями ХЭ и были использованы при расчетах K_2 . На основании рассчитанных K_2 и метеоданных были построены графики, показывающие, с какими воздушными массами связано наибольшее поступление в ЛГС тех или иных ХЭ.

Оценка степени варьирования концентраций ХЭ в дождевых осадках фоновых территорий (на КБС и на других фоновых территориях, в том числе находящихся под контролем СКФМ мониторинга) проведена на основе сравнения полученных нами полевых концентраций Fe, Zn, Ni, Cd, Pb, Cu, Co, Mn, Al с литературными данными.

Для анализа динамики геохимического состава атмосферных осадков за 2017–2024 гг. рассчитывались коэффициенты превышения максимального содержания ХЭ над минимальным:

$$K_{3,4} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}. \quad (3)$$

При расчете K_3 определялось соотношение максимального и минимального содержаний ХЭ в осадках для каждого года исследования. При расчете K_4 оценивались превышения с учетом направления движения воздушных масс основных румбов за весь период исследования.

На основании K_3 и K_4 были выявлены геохимические ассоциации (ГА): 1) характеризующиеся разным спектром ХЭ и интенсивностью их содержания; 2) показывающие, с какими ветрами связано наибольшее поступление ХЭ в ландшафты. Оценка количественного содержания ХЭ в дождевых осадках проводилась по принятой нами градации коэффициентов превышения: низкое содержание $5 < K_3, K_4 < 20$; повышенное — $20 < K_3, K_4 < 50$; высокое $50 < K_3, K_4 < 100$; максимальное $K_3, K_4 > 100$.

Для выявления локальных и трансграничных источников эмиссии химических элементов проведен реанализ траекторий движения воздушных масс для конкретных событий (Stein et al., 2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Природно-климатические условия территории КБС. Курская биосферная станция Института географии РАН расположена на юго-западе Среднерусской лесостепной провинции в центральной части Курской области (Медвенский район). Пологоволнистый рельеф территории осложнен овражно-балочной сетью. Растительный покров представлен сохранившимися и восстановленными луговыми степями, вторичными дубравами, искусственными посадками и лесополосами, сельскохозяйственными культурами. Среди почв преобладают черноземы типичные, выщелоченные и лугово-черноземные. На станции отсутствуют поверхностные водотоки, грунтовые воды залегают на глубине до 20 м. Территория исследования относится к зоне умеренного увлажнения, среднее годовое количество осадков колеблется в пределах 461–583 мм (Дериглазова, Боева, 2020). Режим осадков определяется в основном циклонической деятельностью.

Анализ динамики атмосферных осадков за последние годы свидетельствует о существенной неоднородности распределения годового и сезонного количества влаги (табл. 1).

Согласно архивным климатическим данным (Архив метеонаблюдений⁵; Рыжкова, 2021),

выбранный в качестве реперного 2020 г. был теплый с недостаточным увлажнением — средняя температура воздуха составила 9.0°C, что на 3.0°C выше среднего многолетнего значения. В короткий практически бесснежный зимний период наблюдалась аномально теплая погода с дефицитом осадков (34–60% нормы осадков). Наибольшее количество осадков выпало в весенний период. Количество осадков, выпавших за летне-осенний период, было существенно ниже среднемноголетних значений (за период 1968–2017 гг.), полученных по метеоданным агрометеопоста в пос. Петрин, расположенного в 12 км к северо-востоку от КБС (Дериглазова, Боева, 2020). Сильные ливни наблюдались лишь в середине июля в течение нескольких дней, и в эти дни выпало самое большое количество осадков за весь год. В 2020 г. в центральной части Курской области наблюдалась атмосферная засуха (6.06–12.07.2020 г.) и почвенная засуха (20.08–20.10.2020 г.). Курская метеостанция фиксировала суховеи в периоды 16–18.06; 27–29.07; 30.08–04.09 (Доклад о состоянии ..., 2020, 2021).

По данным метеостанции КБС в 2020 г. выпадение атмосферных осадков часто наблюдалось при движении западных и южных воздушных масс (19.1%), а также при юго-восточном и северо-восточном вторжениях (14.3%) (рис. 1а).

По моделям NOAA HYSPLIT расчет обратных траекторий движения ВМ на высоте 500 м свидетельствуют о значительном влиянии как трансграничного, так и регионального переносов на формирование геохимического состава атмосферных осадков. Повторяемость дождей была достаточно высокой в воздушных массах западного сектора, а также при юго-восточных и северо-восточных вторжениях ВМ (рис. 1б).

Геохимический состав атмосферных осадков КБС. Геохимический состав воздушных масс, приносящих осадки, зависит от очага их формирования и взаимодействия с подстилающей поверхностью по траектории передвижения. Химические элементы находятся в воздушной среде в разных формах, на их содержание в осадках влияют геофизические и геохимические процессы внутри атмосферы, а также воздействие локальных и региональных, природных и промышленных источников эмиссии и трансграничных потоков загрязняющих веществ.

Геохимический состав снежного покрова. В зимний период поступающая атмосферная влага обеспечивает длительное увлажнение ландшафтов, а также позволяет пополнять запасы грунтовых вод. Годовая мощность снежного покрова из года в год сильно отличается (Кудрина и др., 2017; Лукашова и др., 2018). Так, при

⁵ Архив метеонаблюдений.

<http://www.pogodaiklimat.ru/ysummary/34009.htm> (дата обращения 08.06.2023).

Таблица 1. Динамика дождевых осадков (мм) в Курской области

Год	Количество осадков		
	за год	за летний период	за осенний период
2017	636	215–294	112–135
2018	544	182–285	40–70
2019	525	150–202	82–96
2020	507	102–160	52–85
2021	624	131–197	118–224
2022	834	103–179	139–228
2023	772	217–297	152–196

Составлено по: (Доклад о состоянии ..., 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024); <https://kursk.ru/residents/okhrana-okruzhayushchey-sredy/ekologiya-i-prirodopolzovanie/> (дата обращения 17.12.2024).

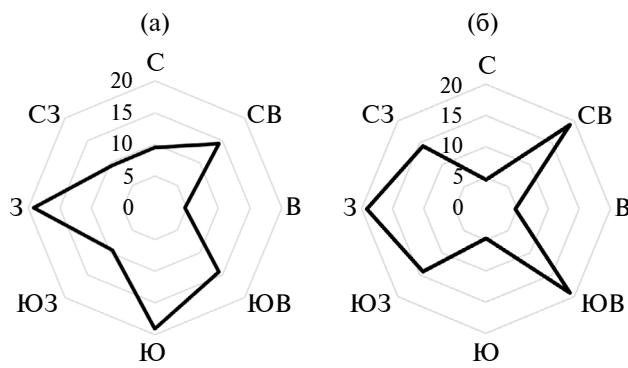


Рис. 1. Роза ветров за теплый период в 2020 г. при выпадении осадков на территории Курской биосферной станции, %: (а) по данным метеостанции КБС (на высоте 2 м); (б) по расчетным модельным данным NOAA HYSPLIT (на высоте 500 м).

полевой снегосъемке 2019 г. высота снежного покрова в лесных и степных ландшафтах достигала 40 см, в агроландшафтах колебалась от 25 до 30 см. В 2024 г. в лесных и степных ландшафтах высота снежного покрова составляла 32 и 19 см соответственно, при заметном визуальном загрязнении снежного профиля.

Динамика гидрохимических показателей в снеговой воде ключевых ландшафтов КБС и окружающих природно-антропогенных ландшафтов, приведена в табл. 2. В 2020 г. устойчивого снежного покрова не было.

Результаты полевых измерений показывают, что кислые по показателям pH снеговые воды в целом слабо минерализованы. Антропогенное влияние — увеличение минерализации и подщелачивание снежного покрова — наблюдается в снеговых водах техногенных ландшафтов (Замотаев и др., 2014; Кайданова и др., 2020).

Анализ геохимического состава снежного покрова на фоновых участках ковыльных

степей и широколиственных лесов КБС свидетельствует о большом диапазоне варьирования содержаний ХЭ в снеговой воде. В табл. 3 представлены ХЭ из группы элементов глобального значения, для которых характерен наибольший размах варьирования концентраций. Сравнение содержаний ХЭ в снеговой воде в 2024 и 2013 гг. выявило, что и в степных, и в лесных ландшафтах в 3 раза отмечается увеличение содержания Al, в степных ландшафтах — в 2 раза Ca. Более значительные увеличения содержаний в снеге за период исследований установлены для ХЭ локального и регионального значения (табл. 4). ХЭ, концентрации которых в снеге степных ландшафтов обнаруживают положительную динамику (возрастают), представляют следующий ряд по убыванию содержаний: Pb > La > Zn > Sn > Cu > Li > Cd > Mo. Наибольшие увеличения содержаний установлены для Pb — в 30 раз и Li — в 13 раз. Для лесных ландшафтов аналогичный ряд ХЭ следующий: Pb > La > Sn > Mo > Cd > Zn > Cu > Li. Наибольшие увеличения содержаний отмечены для Pb, La, Sn: в 30, 12, 10 раз соответственно (см. табл. 4).

Результаты исследований геохимии снежного покрова показывают, что тенденция роста поступления ХЭ в ландшафты КБС сохраняется (Кайданова и др., 2020). Существенных различий в увеличении содержаний в снеге степных и лесных ландшафтов не обнаружено для всех ХЭ, кроме Sn и Mo. Увеличение содержаний этих элементов в снеге лесных ландшафтов в 2 раза выше по сравнению со степными. Спектр ХЭ, содержания которых за период исследований увеличивались, свидетельствует о влиянии на геохимический состав компонентов фоновых ландшафтов локальных источников загрязнения (по содержанию в снеге Pb, Zn, Cd), а также регионального и трансграничного переносов.

Таблица 2. Кислотность (рН) и минерализация (С, г/л) растворенной части актуальных атмосферных осадков, снежного покрова в зимний период в разных типах ландшафтов

Тип ландшафта	Год									
	2013		2017		2018		2019		2024	
	рН	С	рН	С	рН	С	рН	С	рН	С
Агроландшафты			3.3	0.02	5.0	0.01	4.4	0.01		
Ковыльная степь	5.2	0.03	3.4	0.01	4.4	0.01	4.5	0.01	5.3	0.01
Широколиственный лес	5.9	0.05	3.5	0.01	5.4	0.01	4.4	0.01	5.2	0.01
Техногенные (около автомагистралей)			6.8	0.05	6.2	0.03	4.4	0.015		
Техногенные (около КАЗа, Курск)	6.5	0.05	6.3	0.03	6.4	0.02	6.0	0.03		

Таблица 3. Содержание химических элементов глобального значения в снежном покрове степных (числитель) и лесных (знаменатель) ландшафтов Курской биосферной станции

Год	Химический элемент, мкг/л					
	Al	Si	Na	K	Ca	Sr
2013	15.0 16.9	117 109	128 148	126 326	378 773	2.0 4.0
2018	277.4 14.1	230 51	239 723	329 391	1285 1033	6.0 5.7
2019	22.2 24.6	29 45	201 141	174 401	326 527	0.8 0.9
2024	55.7 44.9	76 76	148 158	57 96	799 648	3.6 2.6

Таблица 4. Содержание химических элементов регионального и локального значения в снежном покрове степных (числитель) и лесных (знаменатель) ландшафтов Курской биосферной станции

Год	Химический элемент, мкг/л									
	Ni	Pb	Cd	Sb	Cu	Zn	Li	Sn	Mo	La
2013	0.3 0.8	0.2 0.3	0.2 0.1	0.07 0.5	2.3 2.2	8.9 8.5	0.06 0.04	0.07 0.06	0.03 0.01	0.01 0.01
2018	1.3 2.3	0.6 0.3	1.7 5.7	0.11 0.03	0.9 3.4	23.1 89.8	0.35 0.06	по по	по по	0.09 0.01
2019	0.4 0.6	4.1 5.9	0.4 0.4	0.08 0.08	2.0 1.8	87.0 61.0	0.07 0.03	0.02 0.4	0.03 0.03	0.04 0.03
2024	по по	6.6 6.7	0.4 0.4	0.06 0.06	5.9 4.7	38.7 34.8	0.08 0.1	0.3 0.6	0.05 0.05	0.13 0.12

Примечание: по – ниже предела обнаружения.

Геохимический состав приземных аэрозолей. В 2015–2020 гг. КБС являлась стационарной точкой наблюдения за тонкодисперсными аэрозолями (ТДА) в приземном слое воздуха. При экспериментальных измерениях в фоновых лесных и степных ландшафтах и на пахотных агроландшафтах получены массовые концентрации ТДА (табл. 5).

Наши мониторинговые наблюдения в степных ландшафтах со сплошным проективным покрытием указывают на тенденцию увеличения выноса аэрозолей в атмосферу за последние годы. Это происходит как при конвективном выносе, так и при трансграничном переносе. Синоптическая обстановка оказывает сильное влияние на динамику изменчивости концентраций ТДА в лесостепных ландшафтах, где фоновыми концентрациями считаются 20–40 мкг/м³ (Gubanova et al., 2022). В зимний период при промерзании и промачивании поверхности почв запыление уменьшается. Очевидно, что вынос ТДА на агроландшафты сильно зависит от конкретного типа севооборота, что не позволяет делать однозначные выводы. Так, в 2015 г. поля были засеяны зерновыми, а в 2020 г. некоторые поля были под паром.

Результаты расчетов коэффициентов аэрозольной концентрации ХЭ, определяющие интенсивность накопления элементов в атмосферном аэрозоле фоновых и пахотных ландшафтов Курской области, представлены в табл. 6.

Результаты годовых расчетов показали заметное увеличение аэрозольных концентраций в мае и августе–сентябре, обусловленное ростом запыленности во время проведения сельскохозяйственных работ. Измерения, проводимые в зимний период, выявили повышенные концентрации S и Sr, что, вероятно, связано с отопительным периодом в сельской местности (уголь), а также с дальним солепылепереносом (Gubanova et al., 2022). Расчет коэффициентов аэрозольной концентрации ХЭ относительно их содержаний в черноземной почве КБС позволил оценить реальный привнос вещества с аэрозолями в ланд-

шафты КБС и выявить следующую геохимическую ассоциацию элементов $Hg(81) > S(47) > Sn(36) > Cd(29) > Ag(22) > Pb(18) > Mo(16) > W(13) > Bi(10) > Sb(8) > Cu(7) > Zn(5) > Cr(4)$.

Наши экспериментальные исследования дают рекогносцировочную характеристику фоновых ландшафтов КБС по содержанию в приземной атмосфере аэрозолей и требуют дальнейших исследований. Больших объемов вещества с аэрозольным переносом пока не наблюдается, но отдельные токсичные ХЭ (Hg, S, Cd, Pb, Sn) имеют высокие концентрации при некоторых синоптических ситуациях.

Геохимический состав дождевых осадков. Проводимый с 2017 г. геохимический мониторинг дождевых осадков, выпадающих на территории КБС, свидетельствует о существенной изменчивости их показателей и химического состава в зависимости от погодно-климатических условий [прежде всего, параметров самих дождей (Власов, Еремина, 2020; Прожорина, Нефедова, 2013)], а также от источников эмиссии на пути перемещения ВМ (Кайданова и др., 2024).

В табл. 7 представлены диапазоны изменений величины pH и минерализации осадков, выпавших на территории КБС за период наблюдений.

Данные мониторинга показывают, что дождевые осадки имеют невысокую минерализацию — среднее значение составляет 17.9 мг/л, близкое к региональным фоновым показателям дождей, фиксируемым в Воронежском заповеднике. Единичные максимальные значения минерализации наблюдались в осадках, выпавших в апреле–мае и августе–сентябре. Как уже отмечалось при анализе аэрозолей, основной причиной увеличения минерализации осадков весной (60 мг/л — 17.05.2017 г.; 82 мг/л — 28.04.2019 г.), по-видимому, является обогащение ВМ химическими элементами во время проведения сельхозработ, когда в приземную атмосферу поступает большое количество тонкодисперсных частиц (Кудерина и др., 2018). Повышенные значения минерализации осадков ранней осенью фиксировались после длительного отсутствия дождей

Таблица 5. Массовая концентрация тонкодисперсных аэрозолей на Курской биосферной станции, мкг/м³

Тип ландшафта	Год исследования		
	2015	2017	2020
Агроландшафты, лето	33.5		28.2
Ковыльная степь, лето	22.5	31.4	33.3
Ковыльная степь, зима	16.7		
Широколиственный лес, лето			34.3

Таблица 6. Содержание химических элементов в атмосферном аэрозоле (по значениям K_1), отобранном на территории Центрально-Черноземного заповедника, 2017 г.

Химический элемент	Значение K_1 в атмосферном аэрозоле в разные месяцы				
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
P		1.51	1.03	2.10	4.02
S	37.86	13.91	19.14	80.27	54.1
Li					1.42
Ca				1.51	2.03
Cs					1.99
V					1.83
Cr	5.81	4.06	4.09	6.43	8.14
Mn					1.15
Fe					1.28
Co					1.17
Ni	2.52			1.78	1.07
Cu				1.08	4.29
Zn		1.55		2.60	5.97
As		1.33	10.82		22.59
Sn	4.69		2.34	52.82	
Sb	4.23	9.07		5.98	15.79
Tl					1.19
Pb	37.35	19.57	3.16	21.21	18.83
Bi				71.86	278.2
Mo	5.85	4.09	3.93	6.12	11.13
Ag	4.67			28.61	26.98
Cd	40.06	14.94		27.13	36.20
Hf					1.24
W	13.05	6.86	8.04	7.80	8.16
Hg	31.97	14.40	24.35	24.22	26.06

Примечание: жирным шрифтом выделены $K_1 > 10$.

(2021, 2023 гг.), т.е. также при сильной запыленности приземной атмосферы, способствующей в дальнейшем частичному растворению вымытых из нее твердых частиц (Bayramoğlu Karşı et al., 2018).

Среднее значение кислотности дождевых осадков за период наблюдений составило 5.7 ± 0.5 pH, при этом значения варьировали от минимального pH 4.5 (в начале ноября 2020 г.) до максимального pH 8.1 (в мае 2017 г.). Большинство осадков характеризовалось слабо-кислыми значениями pH, близкими к нижней

границе природного (фонового) закисления осадков (pH 5.0) (Свистов и др., 2009; Galloway et al., 1982). Повышение кислотности осадков до слабощелочной наблюдалось в весенний и в летний периоды.

Результаты исследований дождевых осадков, выпавших на территории КБС в 2020 г., выявили заметные сезонные различия минерализации, кислотности, а также содержаний химических элементов (Кудерина и др., 2024). Повышение pH осадков в щелочную сторону наблюдалось после длительных засух. Увеличение кислот-

Таблица 7. Химические показатели дождевых осадков, 2017–2023 гг.

Год	Химический показатель	
	pH	Минерализация, мг/л
Курская биосферная станция		
2017	4.7–7.4 (8.1)	4.6–16.2 (60.0*)
2018	4.9–6.5	3.0–24.2 (65.8)
2019	4.9–7.4	11–28.1 (82.0)
2020	4.5–6.1	3.9–27.2 (40.1)
2021	5.3–6.4 (7.9)	5.5–27.4 (54.8)
2022	5.5–6.7	5.1–30.1
2023	5.1–6.5	7.0–24.1 (50.5)
Среднее	5.7 ± 0.5	17.9 ± 8.9
Воронежский заповедник имени В.М. Пескова		
Среднее**	5.9	12.1

Примечания: * в скобках указаны единичные значения химических показателей, не учитываемые при расчете средних значений; ** по данным (Свистов и др., 2015).

ности осадков отмечалось при росте объема, а также продолжительности и повторяемости дождей. Наибольшая минерализация фиксировалась при вторжении юго-западных ВМ летом и ранней осенью (27 мг/л) в дождевых осадках, выпавших после прохождения антициклонов, способствующих увеличению интенсивности накопления ХЭ в приземных слоях атмосферы (Park et al., 2015).

Максимальные и высокие концентрации ХЭ глобального значения (всех, кроме Mn), связанны

с ВМ южного и юго-западного направлений: $K_2 > 40$ зафиксированы для Na, Al, Mg. При северо-восточных вторжениях в осадках наблюдалось максимальное содержание Mn ($K_2 = 36$), а также высокое содержание Al ($K_2 = 27$). С восточным переносом связаны высокие значения концентраций Na, Mg, Sr ($K_2 = 22–24$) (рис. 2).

Максимальные концентрации большинства ХЭ регионального и локального значения в атмосферных осадках также отмечались при прохождении ВМ южного и западного секторов (рис. 3). С юго-западными воздушными массами связаны максимальные содержания в осадках U ($K_2 = 125$), Li ($K_2 = 37$), Bi ($K_2 = 28$), Mo, Sb, Pb, Co ($K_2 = 7–12$). При западном переносе в осадках фиксировались максимальные концентрации Sn ($K_2 = 74$) и Zn ($K_2 = 48$), повышенные Li, Y. Осадки воздушных масс северо-западного направления характеризовались максимальными концентрациями Y ($K_2 = 60$), Ag, Zr, ($K_2 = 15–16$), а также высоким содержанием U ($K_2 = 29$). Воздушные массы южных направлений приносили осадки, в которых фиксировались максимальное содержание Cu ($K_2 = 62$), высокое U и Li.

В 2020 г. дождевые осадки при северных и восточных вторжениях ВМ были редки (см. рис. 1а), наблюдались только в начале лета. С ними связано максимальное содержание в осадках Cd ($K_2 = 5–6$), высокое содержание U ($K_2 = 90$), Cu ($K_2 = 46$), Y ($K_2 = 29$), Sn, Zn, Li, ($K_2 = 18–23$).

Наличие лантаноидов, область применения которых в хозяйстве в настоящее время заметно расширяется, фиксировалось при движении ВМ всех направлений. При северных, северо-восточных, и восточных ветрах K_2 лантаноидов не превышали 20. Наибольшие концентрации ($K_2 = 60–80$) были установлены для Ce, Pr, Nd,

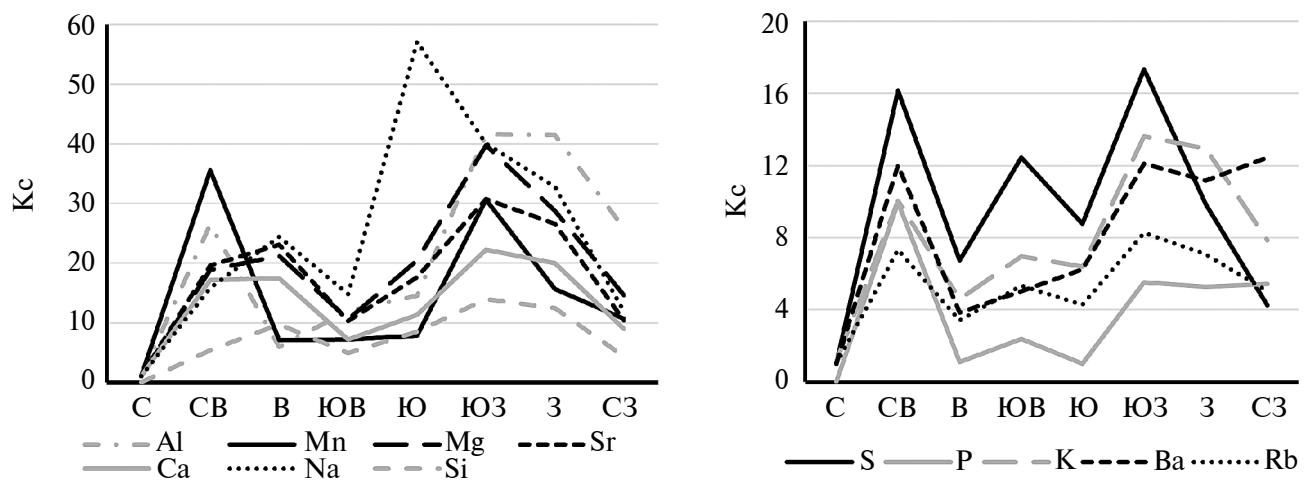


Рис. 2. Содержание химических элементов глобального значения в осадках с учетом направлений движения воздушных масс по данным 2020 г.

Составлено по: (Кудерина и др., 2024).

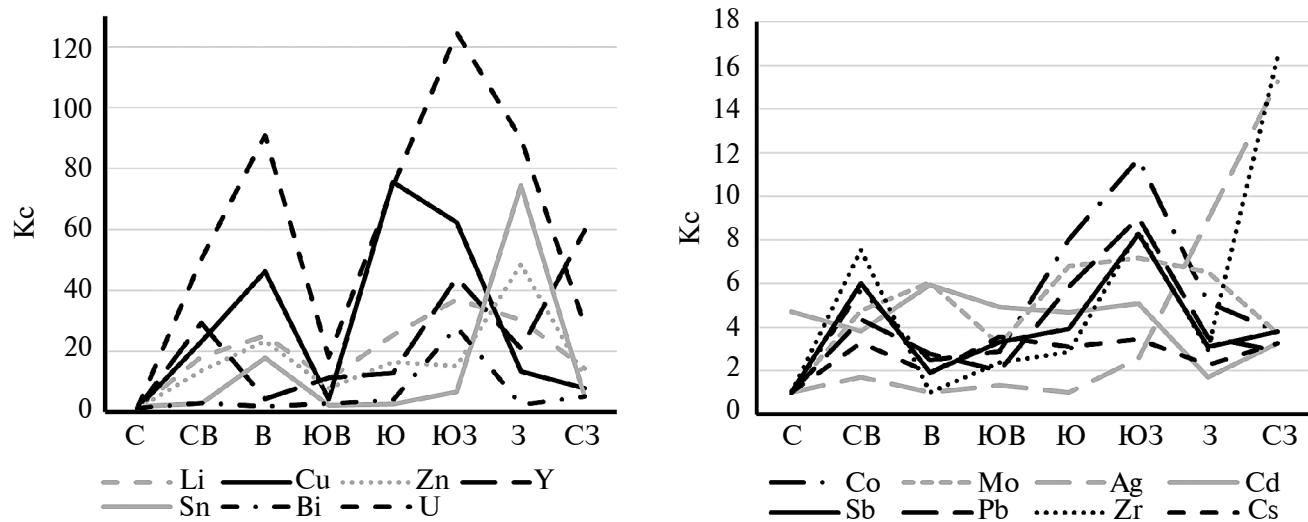


Рис. 3. Содержание химических элементов регионального и локального значения в осадках с учетом направлений движения воздушных масс по данным 2020 г.

Составлено по: (Кудерина и др., 2024).

Sm при ветрах юго-восточных и юго-западных румбов. Следует отметить, что в эту группу входят лантаноиды, содержащиеся в фосфатном сырье и удобрениях (Pang et al., 2002; Sadeghi et al., 2013).

Фиксация максимальных концентраций большинства ХЭ глобального, регионального и локального значения при прохождении ВМ западного сектора свидетельствует о большой доли участия трансграничного переноса в формировании геохимического состава дождевых осадков, выпавших на КБС в 2020 г.

Мониторинг геохимического состава атмосферных осадков показал, что значимыми для дождей являются следующие 30 элементов ($K_3 > 5$): Na, Ca, Mg, K, P, Al, Mn, Fe, Si, S, Sr, Ba, Rb; Cd, Pb, Sb, V, Cu, Zn, Co, Mo, Li, Sn, Ti, W, Be, U, B, Ag, As. В отдельные годы наблюдений в осадках отмечались достаточно высокие концентрации некоторых ХЭ, превышающие минимальные более, чем в 100 раз. На основе расчетов K_3 были выделены две геохимические ассоциации ХЭ: Ni, Cu, Sn, Cd — характеризующиеся $K_3 > 100$ и Sn, Zn, Li, K, Co, Ba с $K_3 > 50$. Наибольшее количество ХЭ с повышенными, высокими и максимальными значениями K_3 наблюдалось в 2017, 2018, 2020 гг. (табл. 8).

Анализ геохимических ассоциаций показывает, что содержания ХЭ в осадках, характеризующиеся $K_3 > 50$ и выше, наблюдались лишь в отдельные годы, что можно объяснить совпадением геохимических (характер поступления ХЭ в атмосферу от источников выбросов) и синоптических (направление переноса ВМ, погодные условия) факторов.

На рис. 4 представлены геохимические ассоциации ХЭ в дождевых осадках, выделенные исходя из расчетов коэффициента K_4 , который вычислялся с учетом направлений перемещения ВМ, на основе данных их обратных траекторий.

Из рисунка хорошо видно, что осадки, приносимые воздушными массами западного сектора и вторжениями с юго-востока, характеризуются наиболее широкими геохимическими ассоциациями. С запада и юго-запада приходят дожди с максимальными содержаниями ($K_4 > 100$) Ni, Pb, Li, Sn, W и повышенными концентрациями Al, Fe, U, Be. Юго-восточные ветры приносят дожди с максимальным и высоким содержанием Ni, Zn, Cu, Ag, Pb, K и повышенным содержание Ba, Li, Mg, Sn. С ветрами южного сектора связаны высокие содержания в дождях Na, Mg, K, что, очевидно, связано с привносом их из аридной зоны юга России и Центральной Азии.

Полученные данные показывают, что содержания практически всех исследованных элементов в дождевых осадках превышают содержания их растворимых форм в снежном покрове. Это свидетельствует об активном взаимодействии в теплый период года воздушных масс с подстилающей поверхностью, которая в свою очередь является источником поступления ХЭ в приземную атмосферу. Особенно выделяются поставкой вещества в атмосферу агроландшафты и техногенные ландшафты.

Результаты проведенных исследований геохимического состава атмосферных осадков КБС свидетельствуют о сильном варьировании содержаний ХЭ в них. Сравнение содержаний ХЭ в дождевых осадках, выпадающих на фоновых ландшафтах КБС и биосферных заповед-

Таблица 8. Геохимические ассоциации химических элементов в дождевых осадках с $K_3 > 20$ в период исследований

Год наблюдений	Геохимические ассоциации		
	$20 < K_3 < 50$	$50 < K_3 < 100$	$K_3 > 100$
2017	$\frac{Ag}{20} < \frac{Mn}{24} < \frac{Sr}{26} < \frac{Mg}{30} < \frac{Mo}{35} < \frac{B}{39} < \frac{Ba}{46}$	$\frac{Sn}{50} < \frac{Zn}{84} < \frac{Co}{87} < \frac{Li}{88}$	$\frac{Cu}{597} < \frac{Ni}{1983}$
2018	$\frac{P}{23} < \frac{Ag}{30} < \frac{Na}{35}$	$\frac{Sn}{50} < \frac{Zn}{61}$	$\frac{Ni}{187}$
2019	$\frac{P}{21} < \frac{Cd}{30} < \frac{Ba}{36}$	$\frac{K}{80}$	
2020	$\frac{Co}{20} < \frac{P}{22} = \frac{Si}{22} < \frac{Na}{26} < \frac{S}{30} < \frac{Ag}{33} < \frac{Mn}{35} < \frac{Cu}{40} < \frac{Zn}{42} < \frac{U}{48}$	$\frac{Li}{80}$	$\frac{Sn}{300}$
2021	$\frac{Rb}{20}$		
2022	$\frac{U}{20}$	$\frac{Ba}{88}$	$\frac{Cd}{143}$
2023	$\frac{Rb}{20} < \frac{Ba}{23} < \frac{Li}{24}$		
2024	$\frac{Ba}{23} = \frac{Li}{23} < \frac{Zr}{26}$		

ников (Б3), показал, что в них повышены как нижний, так и верхний пределы содержаний Cd, Pb по сравнению с осадками других фоновых территорий (табл. 9).

Полученные данные подтверждают, что на фоновый геохимический состав атмосферных осадков, выпадающих на КБС, большое

влияние оказывают локальные источники промышленного загрязнения — выбросы предприятий Курской области и, в частности, Курского аккумуляторного завода (Замотаев и др., 2014; Кайданова и др., 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводимый на КБС ИГ РАН экологический мониторинг показал, что в условиях нарастания аридизации климата для лесостепных ландшафтов особую актуальность приобретает геохимический мониторинг атмосферных осадков, так как именно атмосферное увлажнение является фактором, во многом определяющим их функционирование.

Анализ геохимического состава атмосферных осадков, выпадающих на фоновых территориях КБС, свидетельствует о сильном варьировании в них содержаний ХЭ. За период исследований в снежном покрове, приземных аэрозолях и дождевых осадках установлено увеличение содержаний Na, Ca, Ti, Cd, Ni, Zn, Pb, Cu, Sb, Co, La, Mo, Sr, Li, Sn, W, Hg, S, Ag, Bi, Cr.

Анализ динамики содержаний ХЭ в снеговой воде показал, что в 2024 г. по сравнению с 2013 г. и в степных, и в лесных ландшафтах концентрации Al были выше в 3 раза, в степных ландшафтах — Ca в 2 раза. Более значительные

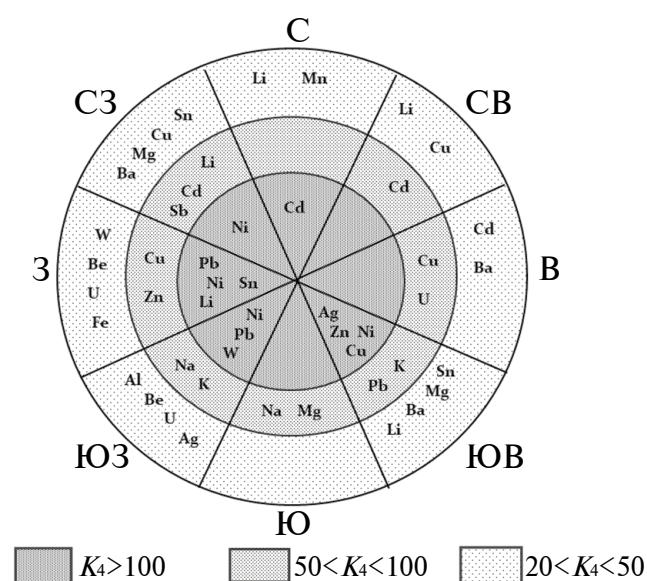


Рис. 4. Геохимические ассоциации химических элементов в дождевых осадках с учетом движения воздушных масс в период 2017–2024 гг.

Таблица 9. Уровни содержания химических элементов в дождевых осадках фоновых ландшафтов ЕТР, мкг/л

Химический элемент	Астраханский БЗ* (за 2006–2023 гг.)	КБС (за 2017–2023 гг.)	Воронежский БЗ* (за 2006–2023 гг.)	Приокско-Террасный БЗ* (за 2006–2023 гг.)	Валдай**
Fe		8.0–64.5			4–26
Zn		1.9–274.9			10–700
Pb	0.2–8.5	2.3–30.4	0.2–6.0	2.0–5.8	0.1–0.9
Cd		0.8–7.9	0.1–0.3	0.1–0.2	0.01–2.6
Ni		0.2–5.0			0.1–11.2
Cu	1.0–13.8	0.4–63.9	2.2–13.6	2.0–10.0	0.1–460
Co		0.1–2.4			0.1–4.1
Mn		1.1–114.2			4–22
Al		1.7–163.4			6–39

Составлено по: * (Обзор ..., 2024) и ** (Баранов и др., 2020).

увеличения концентраций в снеге за период исследований установлены для ХЭ локального и регионального значения — Pb, Li (в 30 и 13 раз в степных ландшафтах), Pb, La, Sn (в 30, 12, 10 раз соответственно, в лесных ландшафтах).

Результаты исследования тонкодисперсных аэрозолей в приземном слое воздуха степных ландшафтов со сплошным проективным покрытием позволили установить тенденцию увеличения их выноса в атмосферу за период исследования. Это происходит как при конвективном выносе, так и при трансграничном переносе. Результаты расчетов содержаний ХЭ в приземном аэрозоле показали заметное увеличение аэрозольных концентраций в августе–сентябре, обусловленное ростом запыленности, в основном, в результате проведения сельскохозяйственных работ. Наиболее высокие концентрации отмечены для S, Cd, Pb, Hg, Bi, As. Стоит отметить, что массовые концентрации аэрозолей играют незначительную роль в балансе атмосферных выпадений (Gubanova et al., 2022), однако отдельные ХЭ при вторжении запыленных ВМ могут быть токсичны для ландшафтов.

Исследования химического состава дождевых осадков, выпавших в 2020 г., позволили оценить его изменчивость в условиях снижения антропогенного давления из-за карантинных мероприятий. 2020 г. отличался дефицитом осадков, высокими температурами воздуха, частыми антициклонами, вызывающими засухи. Летний антициклон способствовал обогащению атмосферных осадков химическими элементами *in situ* за счет внутриоблачных процессов

и эмиссии приземных аэрозолей. Максимальные концентрации ХЭ глобального значения (Na, Al, Mg, Mn), поступающие в атмосферу в основном от природных источников, наблюдались осенью, а ХЭ регионального и локального значения (U, Cu, Sn, Zn, Y, Li, Cd), поступление которых в атмосферу связано преимущественно с промышленными выбросами, фиксировалось во все сезоны. Максимальные концентрации большинства ХЭ в осадках наблюдались при движении воздушных масс западного и южного секторов. При северо-восточных вторжениях в дождевых осадках наблюдалось высокое содержание Mn, Al, Sr, Cu. Воздушные массы, приходящие с востока, приносили осадки с высокими концентрациями Na, Sr, Zn, Mg, S, с юго-востока — La, Ce.

Мониторинг атмосферных осадков за период 2017–2024 гг. на КБС показал, что наиболее высокие концентрации ХЭ в осадках наблюдаются после продолжительных засух, а также в периоды проведения сельхозработ. В это время фиксируются осадки, химические характеристики которых превышают средние показатели. В дождевых осадках практически постоянно присутствуют ХЭ, связанные с локальным источником загрязнения атмосферы — выбросами предприятий Курска — Cd, Ni, Zn, Pb, Sb в концентрациях, превышающих минимальные, в 5–10 раз, в отдельные годы — в 20 и более раз. Преобладающий западный перенос воздушных масс приносит дожди с максимальными содержаниями Ni, Pb, Li, Sn, W, с юго-востока — Ni, Zn, Cu, Ag. Основная роль в этом, очевидно, принадлежит трансграничному переносу и региональным потокам.

Изучение химического состава дождевых осадков, поступающих в фоновые лесостепные ландшафты, — важная составная часть геохимического мониторинга. В программу наблюдений должны быть включены, в первую очередь, химические элементы с наиболее широким диапазоном содержания в атмосферных осадках — Cd, Ni, Cu, Zn, Li, Ag, Pb, W, Sn, Mg, Ba, Na, K.

Проведенные исследования имеют большое практическое значение для организации геохимического и экологического мониторинга в биосферных заповедниках, на КБС ИГ РАН и других фоновых территориях, для экологической оценки атмосферного загрязнения лесостепных ландшафтов ЕТР, для разработки индикаторов происходящих процессов деградации ландшафтов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН “Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования” (FMWS-2024-0007).

FUNDING

The research was carried out within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography of RAS “Biotic, geographical-hydrological and landscape environmental assessments to create the foundations of rational nature management” (FMWS-2024-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баранов Д.Ю., Моисеенко Т.И., Дину М.И. Геохимические закономерности формирования атмосферных выпадений в условно фоновом районе Валдайского национального парка // Геохимия. 2020. Т. 65. № 10. С. 1–16.

<https://doi.org/10.31857/S0016752520100039>

Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почве / Полное собрание трудов академика А.П. Виноградова. М., 2021. Т. 4. С. 273–275.

Власов Д.В., Еремина И.Д. Влияние параметров дождей на интенсивность вымывания из атмосферы потенциально токсичных элементов в Москве // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: матер. III Всерос. науч.-практич. конф. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2020. С. 380–388,

<https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1874-2.2020.1-465>

Дериглазова Г.М., Боева Н.Н. Динамика погодных условий Курской области за последние 50 лет // Вестн. Курской гос. сельско-хоз. акад. 2020. № 7. С. 15–21.

Доклад о состоянии и использовании земель в Курской области за 2020 г. Курск, 2021. 119 с.

Еремина И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2019. № 3. С. 3–10.

Замотаев И.В., Кайданова О.В., Кудерина Т.М., Курбатова А.Н., Суслова С.Б., Шилькрот Г.С. Динамика загрязнения тяжелыми металлами городских ландшафтов Курской области // Геополитика и экогеодинамика регионов. Симферополь: Изд-во ФГ АОУ ВО Крымский фед. ун-т, 2014. Т. 10. № 2 (13). С. 322–327.

Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов / Справ.: в 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. Кн. 2: Главные р-элементы. М.: Недра, 1994. 303 с.

Кайданова О.В., Суслова С.Б., Кудерина Т.М., Шилькрот Г.С., Лунин В.Н. Геохимическая характеристика атмосферных осадков фоновых лесостепных ландшафтов Европейской территории России // Проблемы региональной экологии. 2024. № 5. С. 72–78.

<https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-5-72-78>

Кайданова О.В., Суслова С.Б., Кудерина Т.М., Замотаев И.В., Кудиков А.В. Геохимический мониторинг лесостепных ландшафтов Курской биосферной станции // Проблемы региональной экологии. 2020. № 4. С. 37–42.

<https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-14037>

Коробка О.В., Овчаренко Е.А., Эйрих А.Н., Серых Т.Г., Дрюнина Е.Ю., Папина Т.С. Химический состав атмосферных осадков города Барнаула // Ползуновский вестн. 2014. Т. 2. № 4. С. 80–83.

Кудерина Т.М., Кайданова О.В., Суслова С.Б., Лунин В.Н., Шилькрот Г.С., Кудиков А.В. Геохимический мониторинг атмосферных осадков лесостепных ландшафтов на КБС в 2020 году / Тренды современной географии и географического образования: матер. V Международ. науч.-практич. конф., посвященной 90-летию Курского гос. ун-та и десятилетию науки и технологий (Курск, 19 апреля 2024 г.) / отв. ред. И.А. Гонеев, Е.А. Батраченко. Курск: КГУ, 2024. С. 191–210.

Кудерина Т.М., Лунин В.Н., Суслова С.Б. Геохимический состав атмосферных осадков лесостепных ландшафтов Курской биосферной станции // Проблемы региональной экологии. 2018. № 2. С. 78–83.

<https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-12078>

Кудерина Т.М., Суслова С.Б., Замотаев И.В., Кайданова О.В., Шилькрот Г.С., Лунин В.Н. Атмогеохимическое состояние лесостепных ландшафтов Курской биосферной станции / Ландшафтovedение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: матер. XII Международ. ландшафтной конф. (Тюмень–Тобольск, 22–25 августа 2017 г.) / под ред. К.Н. Дьяконова, К.А. Мерекалова, Т.И. Харитонова. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2017. Т. 1. С. 295–297.

Лобковский В.А., Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковская Л.Г. Пути выбора индикаторов для оценки нейтрального баланса деградации земель с учетом локальных и региональных особенностей России // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 3. С. 75–82.

<https://doi.org/10.24412/1816-1863-2020-13075>

Лукашова О.П., Дмитрова Е.С., Богатырева М.А. Особенности снежного покрова как природная предпосылка геохимии лесостепных ландшафтов Курской области / Современные проблемы ландшафтovedения и геоэкологии: матер. VI международ. науч. конф. (к 100-летию со дня рождения профессора В.А. Дементьева) (Минск, 13–16 ноября 2018 г.) / под ред. А.Н. Витченко. Минск: БГУ, 2018. С. 209–211.

НСАМ № 520-АЭС/МС, Определение элементного состава природных, питьевых, сточных и морских вод атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами с индуктивно связанный плазмой (редакция 2017 г.).

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2024. 218 с.

<http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2023.pdf>

Прожорина Т.И., Нефедова Е.Г. Исследование метеорологических и химических параметров атмосферных осадков в осенне-зимний период как индикатора загрязнения воздуха г. Воронежа // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия Геогр. Геоэкология. 2013. № 1. С. 145–149.

РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы (в ред. РД 52.04.667–2005, утв. Росгидрометом). М., 2006. 532 с.

Робертус Ю.В., Удачин В.Н., Рихванов Л.П., Кивацкая А.В., Любимов Р.В., Юсупов Д.В. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая // Изв. Томск. политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 9. С. 39–48.

Рыжкова И.В. Климатические особенности 2020 года на Стрелецком участке Центрально-Черноземного заповедника / Флора и растительность Центрального Черноземья – 2021: матер. межрегионал. науч. конф., посвященной 50-летию Музея природы Центрально-Черноземного гос. природ. Биосферного заповедника им. проф. В.В. Аlexина (24 апреля 2021 г.) / отв. ред. О.В. Рыжков. Курск: Изд. дом ВИП, 2021. С. 194–197.

Свистов П.Ф., Першина Н.А., Павлова М.Т. Атмосферные осадки: химический состав и кислотность // Природа. 2015. № 6. С. 28–36.

Свистов П.Ф., Палищук А.И., Першина Н.А. Фоновый уровень состояния атмосферы по многолетним данным о химическом составе атмосферных осадков. Тр. Главной геофизич. обсерватории им. А.И. Войкова, 2009. С. 116–142.

Топчая В.Ю., Котова Е.И., Чечко В.А. Вклад трансграничного атмосферного переноса тяжелых металлов в загрязнение окружающей среды Калининградской области // Успехи современного естествознания. 2021. № 9. С. 65–69.

<https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37687> (дата обращения 18.05.2022).

Bayramoğlu Karşı M.B., Yenisoy-Karakas S., Karakas D. Investigation of washout and rainout processes in sequential rain samples // Atmosph. Env. 2018. Vol. 190. P. 53–64.

Galloway J.N., Likens G.E., Kneen W.C., Miller J.M. The composition of precipitation in remote areas of the world // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87 (11). P. 8771–8786.

Garmo O.A., Skjelkvale B.L., De Wit H.A., Colombo L., Curtis C., Folster J., Hoffmann A., Hruška J., Hogasen T., Jeffries D.S., Keller W.B., Krám P., Majer V., Monteith D.T., Paterson A.M., Rogora M., Rzychon D., Steingruber S., Stoddard J.L., Vuorenmaa J., Worsztynowicz A. Trends in surface water chemistry in acidified areas in Europe and North America from 1990–2008 // Water Air Soil Poll. 2014. Vol. 225. № 3. P. 1–14.

Gubanova D.P., Chkhetiani O.G., Kudrina T.M., Jordanskii M.A., Maksimenko L.O., Artamonova M.S. Long-term variability of the composition of near-surface aerosol over desertified and arid zones in southern Russia // Atmos. Ocean. Opt. 2022. Vol. 35. № 6. P. 680–690.

<https://doi.org/10.1134/s1024856022060148>

Kondrat'ev I.I., Kubai B.V., Semykina G.I. Impact of transboundary and natural factors on chemical composition of precipitation in the Far East of Russia // Russ. Meteorol. Hydrol. 2013. Vol. 38. № 10. P. 681–687.

Kuderina T.M., Suslova S.B., Lunin V.N., Kudikov A.V.
 Atmospheric Moisture as a Factor of Land
 Degradation Neutrality in Forest–Steppe
 Landscapes // *Arid Ecosyst.* 2020. Vol. 10. № 2.
 P. 156–160.

<https://doi.org/10.1134/s2079096120020079>

Pang X., Li D., Peng A. Application of rare-earth elements
 in the agriculture of China and its environmental
 behavior in soil // *Env. Sci. Poll. Res.* 2002. Vol. 9.
 № 2. P. 143–148.

Park S.-M., Seo B.-K., Lee G., Kahng S.-H., Jang Y.W.
 Chemical composition of water soluble inorganic

species in precipitation at Shihwa Basin, Korea //
Atmosph. 2015. Vol. 6. P. 732–750.

Sadeghi M., Petrosino P., Ladenberger A., Albanese S.,
Andersson M., Morris G., Lima A., De Vivo B. Team
 Ce, La and Y concentrations in agricultural and
 grazing-land soils of Europe // *J. Geochem. Explor.*
 2013. Vol. 133. P. 202–213.

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B.,
Cohen M.D., Ngan F. NOAA’s HYSPLIT
 atmospheric transport and dispersion modeling
 system // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2015. Vol. 96.
 P. 2059–2077.

Landscape and Geochemical Monitoring of Atmospheric Precipitation in the Forest-Steppe Zone of European Russia (Using the Example of Kursk Oblast)

T. M. Kuderina^{a,*}, S. B. Suslova^a, O. V. Kaidanova^a, G. S. Shilkrot^a,
V. N. Lunin^a, and A. V. Kudikov^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: kuderina@igras.ru*

The results of long-term geochemical monitoring of atmospheric precipitation on the territory of the Kursk Biosphere Station (KBS) of the IG RAS are being discussed. The landscapes of KBS have the status of natural landscapes. The chemical composition of snow cover has been studied since 2013, surface aerosols since 2015, and rainfall since 2017. 2020 was chosen as the main reference year for the study of liquid precipitation, during which anthropogenic activity was reduced due to COVID-19. Mineralization and pH were measured in snow and rain waters, and the geochemical composition of precipitation and aerosols was determined using ICP-MS and ICP-AES methods. The dynamics in the geochemical composition of the snow cover is considered on the basis of the identification of a series of chemical elements, the concentrations of which in the snow of the natural landscapes of the KBS show a positive trend (increase). Concentration coefficients for aerosols and rain precipitation have been calculated to reveal the intensity of the accumulation of chemical elements. The analysis of the dynamics of the geochemical composition of rainfall was carried out on the basis of calculations of the excess coefficients for each year of study and taking into account the movement of the air masses. During the study period, an increase in the contents of Na, Ca, Ti, Cd, Ni, Zn, Pb, Cu, Sb, Co, La, Mo, Sr, Li, Sn, W, Hg, S, Ag, Bi, Cr was found in snow cover, surface aerosols, and precipitation. The range of chemical elements, which detected in atmospheric precipitation, indicates the influence of regional and transboundary air masses on the geochemical composition of this precipitation. The maximum concentrations of Ni, Pb, Li, Sn and W were observed with the predominant western moving of air masses. High concentrations of Zn, Cu and Ag are associated with southeastern atmospheric invasions. The precipitation concentrations of Cd, Ni, Zn and Pb are associated with air masses coming from the north, which indicates the role of local emission sources from Kursk enterprises in the formation of the geochemical composition of the landscapes components on the KBS. The calculation results showed that a noticeable increase in the content of chemical elements in aerosols and rains is observed in May and in August–September and is due to an increase in atmospheric dust during agricultural work. Studies of the autumn-winter period revealed increased concentrations of S and Sr, probably related to the heating period (coal), as well as long-range transport of salts and dust particles. Increased concentrations of most chemical elements in precipitation and aerosols were recorded after prolonged anticyclones, which contributed to an increase in the intensity of their accumulation in the surface atmosphere.

Keywords: chemical elements, concentration coefficient, rainfall, snow cover, surface aerosols, air masses, transboundary transfer

REFERENCES

- Baranov D.Yu., Moiseenko T.I., Dinu M.I. Geochemical trends in the formation of atmospheric precipitation in the conditionally background area of the Valdai national park. *Geokhim.*, 2020, vol. 65, no. 10, pp. 1–16. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0016752520100039>
- Bayramoğlu Karşı M.B., Yenisey-Karakas S., Karakaş D. Investigation of washout and rainout processes in sequential rain samples. *Atmosph. Env.*, 2018, vol. 190, pp. 53–64.
- Deriglazova G.M, Boeva N.N. Dynamics of weather conditions in Kursk region over the last 50 years. *Vestn. Kursk. Gos. Sel'skokh. Akad.*, 2020, no. 7, pp. 15–21. (In Russ.).
- Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' v Kurskoi oblasti za 2020 g.* [Report on the State and Use of Land in the Kursk Region for 2020]. Kursk, 2021. 119 p.
- Eremina I.D. Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and trends of its long-term changes. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (In Russ.).
- Garmo O.A., Skjelkvale B.L., de Wit H.A., Colombo L., Curtis C., Folster J., Hoffmann A., Hruška J., Hogasen T., Jeffries D.S., Keller W.B., Krám P., Majer V., Monteith D.T., Paterson A.M., Rogora M., Rzychon D., Steingrubler S., Stoddard J.L., Vuorenmaa J., Worsztynowicz A. Trends in surface water chemistry in acidified areas in Europe and North America from 1990–2008. *Water Air Soil Poll.*, 2014, vol. 225, no. 3, pp. 1–14.
- Gubanova D.P., Chkhetiani O.G., Kuderina T.M., Iordanskii M.A., Maksimenkov L.O., Artamonova M.S. Long-term variability of the composition of near-surface aerosol over desertified and arid zones in southern Russia. *Atmos. Ocean. Opt.*, 2022, vol. 35, no. 6, pp. 680–690.
- Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: Spravochnik. Kn. 2: Glavnye r-elementy* [Ecological Geochemistry of Elements: A Reference Book. Books 2: Main R-Elements]. Burenkov E.K., Ed. Moscow: Nedra Publ., 1994. 303 p.
- Kaidanova O.V., Suslova S.B., Kuderina T.M., Zamotaev I.V., Kudikov A.V. Geochemical monitoring of forest-steppe landscapes of the Kursk Biosphere Station. *Probl. Reg. Ekol.*, 2020, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-14037>
- Kaidanova O.V., Suslova S.B., Kuderina T.M., Shil'krot G.S., Lunin V.N. Geochemical characteristics of atmospheric precipitation in the background forest-steppe landscapes of the European territory of Russia. *Probl. Reg. Ekol.*, 2024, no. 5, pp. 72–78. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-5-72-78>
- Kondrat'ev I.I., Kubai B.V., Semykina G.I., Kachur A.N. Impact of transboundary and natural factors on chemical composition of precipitation in the Far East of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, pp. 681–687.
<https://doi.org/10.3103/S1068373913100051>
- Korobka O.V., Ovcharenko E.A., Eirikh A.N., Serykh T.G., Dryupina E.Yu., Papina T.S. Chemical composition of atmospheric precipitation of the city of Barnaul. *Polzunovskii Vestn.*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 80–83. (In Russ.).
- Kuderina T.M., Kaidanova O.V., Suslova S.B., Lunin V.N., Shil'krot G.S., Kudikov A.V. Geochemical monitoring of atmospheric precipitation in landscapes of the forest-steppe zone at the Kursk biosphere station in 2020. In *Trendy sovremennoi geografii i geograficheskogo obrazovaniya: materialy V Mezhdunar. nauchno-prakt. konf., posvyashchennoi 90-letiyu Kurskogo gos. un-ta i desyatiliyu nauki i tekhnologii (19 aprelya 2024g., g. Kursk)* [Trends in Modern Geography and Geographical Education: Proceedings of the 5th Int. Sci. and Pract. Conf. Dedicated to the 90th Anniversary of Kursk State University and the Decade of Science and Technology (April 19, 2024, Kursk)]. Goneev I.A., Batrachenko E.A., Eds. Kursk: KGU, 2024, pp. 191–210. (In Russ.).
- Kuderina T.M., Lunin V.N., Suslova S.B. Geochemical content of precipitation in forest-steppe landscapes of Kursk biosphere station. *Probl. Reg. Ekol.*, 2018, vol. 2, pp. 78–83. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-12078>
- Kuderina T.M., Suslova S.B., Lunin V.N., Kudikov A.V. Atmospheric moisture as a factor of land degradation neutrality in forest-steppe landscapes. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, pp. 156–160.
<https://doi.org/10.1134/S2079096120020079>
- Kuderina T.M., Suslova S.B., Zamotaev I.V., Kaidanova O.V., Shil'krot G.S., Lunin V.N. Atmo-geochemical state of forest-steppe landscapes at Kursk biosphere station of the IG RAS. In *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoichivogo razvitiya: materialy XII Mezhdunar. landshaftnoi konf., Tyumen'-Tobol'sk, 22–25 avgusta 2017 g. T. 1* [Landscape Science: Theory, Methods, Landscape and Environmental Management and Sustainable Development: Proc. of the 12th Int. Landscape Conf., Tyumen-Tobolsk, August 22–25, 2017. Vol. 1]. D'yakonov K.N., Merekalov K.A., Kharitonov T.I., Eds. Tyumen: Izd-vo TGU, 2017, pp. 295–297. (In Russ.).
- Lukashova O.P., Dmitrova E.S., Bogatyreva M.A. Features of snow cover as a natural prerequisite for the geochemistry of forest-steppe landscapes of the

- Kursk region. In *Materialy VI mezhdunar. nauchn. konf. (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.A. Dement'eva)* [Proc. of the 6th Int. Sci. Conf. (Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of Prof. V.A. Dementiev)]. Vitchenko A.N., Ed. Minsk: BGU, 2018, pp. 209–211. (In Russ.).
- Lobkovskii V.A., Kust G.S., Andreeva O.V., Lobkovskaya L.G. Ways of choosing indicators for assessing the land degradation neutrality taking into account the local and regional characteristics of Russia. *Ekol. Urban. Territor.*, 2020, no. 3, pp. 75–82. (In Russ.).
- NSAM № 520-AES/MS, *Opredelenie elementnogo sostava prirodnykh, pit'evykh, stochnykh i morskikh vod atomno-emissionnym i mass-spektral'nym metodami s induktivno svyazannoi plazmoy* [NSAM No. 520-AES/MS, Determination of the Elemental Composition of Natural, Drinking, Wastewater and Marine Waters by Atomic Emission and Mass Spectral Methods with Inductively Coupled Plasma], 2017.
- Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2023 god* [Overview of the State and Pollution of the Environment in the Russian Federation for 2023]. Chernogaeva G.M., Ed. Moscow: Rosgidromet, 2024. 218 p.
- Pang X., Li D., Peng A. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. *Env. Sci. Poll. Res.*, 2002, vol. 9, no. 2, pp. 143–148.
- Park S.-M., Seo B.-K., Lee G., Kahng S.-H., Jang Y.W. Chemical composition of water soluble inorganic species in precipitation at Shihwa Basin, Korea. *Atmosph.*, 2015, vol. 6, pp. 732–750.
- Prozhorina T.I., Nefedova E.G. Investigation of meteorological and chemical parameters of atmospheric precipitation in the autumn-winter period as an indicator of air pollution in Voronezh. *Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser.: Geogr. Geoekol.*, 2013, no. 1, pp. 145–149. (In Russ.).
- RD 52.04.186–89. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [RD 52.04.186–89. Guidelines for Air Pollution Control]. Moscow: Rosgidromet, 2006. 532 p.
- Robertus Yu.V., Udachin V.N., Rihvanov L.P., Kivackaya A.V., Lyubimov R.V., Yusupov D.V. Indication by the components of the natural environment of the transboundary transfer of pollutants to the territory of Gorny Altai. *Izv. Tomsk. Politekhn. Univ. Inzhinir. Georesur.*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 39–48. (In Russ.).
- Ryzhkova I.V. Climatic features of 2020 in the Streletsky section of the Central Chernozem Reserve. In *Flora i rastitel'nost' Tsentral'nogo Chernozem'ya — 2021: materialy mezhdunar. nauchn. konf., posvyashchennoi 50-letiyu Muzeya prirody Tsentral'nogo Chernozem'nogo gos. prir. biosf. zapovednika im. prof. V.V. Alekhina* (24 aprelyya 2021 g.) [Flora and Vegetation of the Central Chernozem Region — 2021: Materials of the Interregional Sci. Conf. Dedicated to the 50th Anniversary of the Museum of Nature of the Alekhine Central Chernozem State Biological Reserve]. Ryzhkov O.V., Ed. Kursk: VIP Publ., 2021, pp. 194–197.
- Sadeghi M., Petrosino P., Ladenberger A., Albanese S., Andersson M., Morris G., Lima A., De Vivo B. Team Ce, La and Y concentrations in agricultural and grazing-land soils of Europe. *J. Geochem. Explor.*, 2013, vol. 133, pp. 202–213.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Am. Meterol. Soc.*, 2015, vol. 96, pp. 2059–2077.
- Svistov P.F., Pershina N.A., Pavlova M.T. Precipitation: Chemical composition and acidity. *Priroda*, 2015, no. 6, pp. 28–36. (In Russ.).
- Svistov P.F., Polishchuk A.I., Pershina N.A. The background level of the atmosphere according to long-term data on the chemical composition of atmospheric precipitation. In *Trudy Glavnogo geofizicheskoi observatorii im. A.I. Voeikova* [Proc. of the Main Geophysical Observatory Named After A.I. Voeikov], 2009, pp. 116–142. (In Russ.).
- Topchaya V.Yu., Kotova E.I., Chechko V.A. Contribution of transboundary atmospheric transport of heavy metals to environmental pollution of the Kaliningrad region. *Uspekhi Sovrem. Estestv.*, 2021, no. 9, pp. 65–69. (In Russ.).
- <https://doi.org/10.17513/use.37687>
- Vlasov D.V., Eremina I.D. Influence of rain parameters on the intensity of leaching of potentially toxic elements from the atmosphere in Moscow. In *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: materialy III Vseros. nauchno-prakt. konf.* [Current Trends and Prospects of Hydrometeorology Development in Russia: Materials of the 3d All-Russian Sci. and Pract. Conf.]. Irkutsk: Izd-vo IGU, 2020, pp. 380–388. (In Russ.).
- <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1874-2.2020.1-465>
- Zamotaev I.V., Kaidanova O.V., Kuderina T.M., Kurbatova A.N., Suslova S.B., Shil'krot G.S. The dynamics of heavy metal pollution of urban landscapes of Kursk region. *Geopol. Ekogeodin. Reg.*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 322–327. (In Russ.).