

СТАТЬИ

УДК 631.412(571.12)
DOI 10.17513/use.38462

ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В СЕРЫХ И ТЕМНО-СЕРЫХ ПОЧВАХ ЮГА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

**Земцова Е.С. ORCID ID 0000-0002-0093-9064,
Якимов А.С. ORCID ID, 0000-0002-1303-8492,
Токарева А.Ю. ORCID ID 0000-0003-1727-1408,
Колобов А.П. ORCID ID 0000-0001-7239-959X,
Алимова Г.С. ORCID ID 0000-0001-6275-6143**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Тобольская комплексная научная станция» Уральского отделения Российской академии наук,
Тобольск, Российская Федерация, e-mail: zemcovaelena@mail.ru*

Цель исследования – изучение закономерностей профильного распределения макроэлементов (Fe, Al, K, Na, Ca, Mg, Mn, P) в целинных серых и темно-серых почвах Зауралья для углубления понимания их генезиса и оценки агроэкологического потенциала. Исследование выполнено на основе анализа восьми почвенных профилей, заложенных на особо охраняемых природных территориях регионального значения (заказники и памятники природы) в природных зонах (подзонах) южной тайги, подтайги и северной лесостепи Тюменской области. Проведено морфологическое описание, определение гранулометрического состава, массовой доли органического вещества и содержания макроэлементов методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после экстракции смесью азотной (HNO_3) и соляной (HCl) кислот («царская водка»). Выявлена элювиально-иллювиальная дифференциация Fe и Al, с аккумуляцией в текстурном горизонте (прирост содержания до 157 и 125 % соответственно), связанная с процессом лессиважа и подтверждаемая корреляцией с содержанием глины ($r = 0,58$). Доказано биогенное накопление P и Mn в органогенных горизонтах, проявляющееся в тесной связи с органическим веществом ($r = 0,81$ и $r = 0,73$ соответственно). Установлены различия в миграционной способности Ca и Mg при близких коэффициентах биологического поглощения, а также относительно равномерное распределение K по профилю вследствие баланса биогенной аккумуляции и минералогического запасания. Распределение Na подтверждает периодически промывной режим исследуемых почв.

Ключевые слова: серые и темно-серые почвы, юг Тюменской области, макроэлементы, профильное распределение, геохимия почв

PROFILE DISTRIBUTION OF MACROELEMENTS IN GRAY AND DARK GRAY SOILS OF SOUTH OF THE TYUMEN REGION

**Zemtsova E.S. ORCID ID 0000-0002-0093-9064,
Yakimov A.S. ORCID ID, 0000-0002-1303-8492,
Tokareva A.Yu. ORCID ID 0000-0003-1727-1408,
Kolobov A.P. ORCID ID 0000-0001-7239-959X,
Alimova G.S. ORCID ID 0000-0001-6275-6143**

*Federal State Budgetary Institution of Science “Tobolsk Integrated Scientific Station”
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Tobolsk, Russian Federation,
e-mail: zemcovaelena@mail.ru*

The purpose of the study is to study the patterns of profile distribution of macroelements (Fe, Al, K, Na, Ca, Mg, Mn, P) in virgin gray and dark gray soils of the Trans-Ural region to deepen the understanding of their genesis and assess the agroecological potential. The study was carried out based on the analysis of 8 soil profiles laid in specially protected natural areas of regional significance (nature reserves and natural monuments) in the southern taiga, subtaiga and northern forest-steppe zones (subzones) of the Tyumen region. A morphological description was carried out, the particle size distribution, the mass fraction of organic matter and the content of macroelements were determined using atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma after extraction with a mixture of nitric (HNO_3) and hydrochloric (HCl) acids («Aqua regia»). Eluvial-illuvial differentiation of Fe and Al with accumulation in the textured horizon was revealed (increase in content up to 157 % and 125 %, respectively), associated with the process of loessivage and confirmed by correlation with clay content ($r = 0,58$). Biogenic accumulation of P and Mn in organogenic horizons has been proven, which manifests itself in close connection with organic matter ($r = 0,81$ and $r = 0,73$, respectively). Differences in the migration ability of Ca and Mg at similar biological absorption coefficients were established, as well as a relatively uniform distribution of K along the profile due to the balance of biogenic accumulation and mineralogical reserve. The distribution of Na confirms the periodically leaching regime of the studied soils.

Keywords: gray and dark gray soils, south of the Tyumen region, macroelements, profile distribution, soil geochemistry

Введение

Почва имеет ярко выраженную пространственную неоднородность, которая проявляется в двух основных направлениях: вертикальном и горизонтальном [1, с. 6–14]. Вертикальная неоднородность выражается в формировании генетических горизонтов с различными свойствами [2, с. 180–193]. Горизонтальная неоднородность формируется под влиянием комплекса факторов почвообразования (почвообразующая порода, рельеф, климат, флора и фауна, время), создающих сложную пространственную мозаику даже на небольших расстояниях и может быть как нивелирована, так и усиlena антропогенным воздействием [1, с. 22–37]. Учет этого свойства является критически важным для эффективного земледелия, экологического мониторинга и землеустройства.

Почва представляет собой сложную полихимическую систему, в которой содержание отдельных химических элементов может различаться в тысячи раз и более, а сами элементы могут находиться в составе различных по природе и растворимости соединениях, унаследованных от почвообразующей породы или сформированных в процессе почвообразования [3, с. 3].

Почвенный покров юга Тюменской области (без автономных округов) отличается значительным разнообразием, среди зональных типов серые и темно-серые почвы [4, с. 72, 74] занимают второе место по площади после подзолистых – почти 1 млн га (около 6,3% территории) [5; 6, с. 91]. Их ареалы формируются в лесостепной и подтаежной зонах, а также частично заходят в южную тайгу. Они приурочены к дренированным участкам водоразделов и верхней части склонов под березовыми или березово-осиновыми лесами [7].

Высокий агрономический потенциал серых и темно-серых почв Северного Зауралья исторически обусловил их активное сельскохозяйственное использование. К концу XX в. в пашню было вовлечено более 80% их площади [6, с. 91]. В настоящее время они рассматриваются как перспективный резерв для расширения пахотного фонда [1, с. 43; 8]. Благоприятные свойства этих почв связаны с почвообразующими породами региона – лессовидными и покровными суглинками, содержащими карбонаты кальция, которые ограничивают развитие оподзоливания [6, с. 75]. Однако данные агрохимического обследования пашен фиксируют крайне неоднородный характер базовых свойств серых и темно-серых почв, что значительно усложняет их идентификацию и разработку научно обоснованных мероприятий по сохранению и повышению плодородия [1, с. 3; 9].

Несмотря на обширную изученность морфологических и основных физико-химических свойств серых и темно-серых почв Зауралья [1, с. 152–154; 10], профильное распределение в них макроэлементов остается недостаточно изученным.

Цель исследования – установление закономерностей данного процесса.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны целинные серые и темно-серые почвы, которые никогда не использовались в пашне. Исследования проводились в 2024 г. на территории особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального значения (заказники и памятники природы) в зонах (подзонах) южной тайги, подтайги и северной лесостепи, где было заложено восемь почвенных разрезов (рис. 1). В каждом из них изучено морфологическое строение почвенного профиля и выполнен погоризонтный отбор образцов для последующего лабораторного анализа.

Морфологическое строение изученных почв представлено последовательно сменяющимися генетическими горизонтами, в соответствии с типом почвы.

Профиль серой почвы в разрезе 1: грубогумусовый горизонт (АО) (0–6(9) см) → серогумусовый горизонт (AY) (6(9)–24 см) → серогумусово-текстурный горизонт (AYBT) (24–49 см) → текстурный (BT) (49–71(75) см) → переходный горизонт (BTC) (71(75)–95 см) → почвообразующая порода (C) (95–115 см).

Профиль серой почвы в разрезе 2: АО (0–7(9) см) → AY (7(9)–18(20) см) → AYBT (18(20)–32(52) см) → BT1 (32(52)–72 см) → BT2 (72–100 см) → C (100–125 см).

Профиль серой почвы в разрезе 3: АО (0–7(11) см) → AY (7(11)–18(20) см) → AYBT (18(20)–27(32) см) → BT (27(32)–60 см) → C (60–90 см).

Профиль серой почвы в разрезе 4: АО (0–8 см) → AY (8–15(29) см) → AYBT (15(29)–30(35) см) → BT (30(35)–68 см) → C (68–100 см).

Профиль темно-серой почвы в разрезе 5: грубогумусовый горизонт (АО) (0–7(8) см) → темногумусовый горизонт (AU) (7(8)–20(24) см) → темногумусово-текстурный горизонт (AUBT) (20(24)–51(62) см) → текстурный глееватый горизонт (BTg) (51(62)–72 см) → почвообразующая глееватая порода (Cg) (72–100 см).

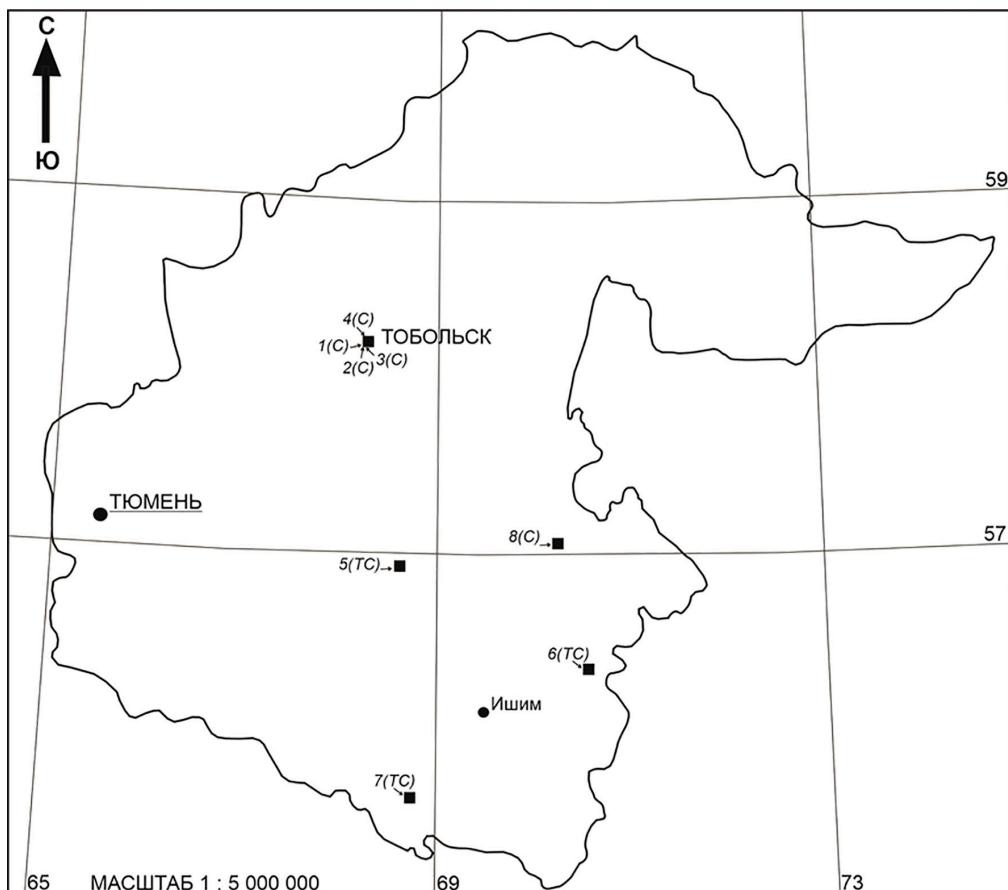


Рис. 1. Местоположение почвенных разрезов: 1 – памятник природы «Киселевская гора с Чувашским мысом»; 2, 3 – памятник природы «Окрестности дома отдыха «Тобольский»»; 4 – экологическая тропа в г. Тобольске; 5 – заказник «Алабуга»; 6 – заказник «Ереминский»; 7 – памятник природы «Озеро Соленое»; 8 – заказник «Викуловский». Буквами обозначен тип почвы: С – серая, ТС – темно-серая

Профиль темно-серой почвы в разрезе 6:
АО (0–8 см) → AU (8–24 см) → AUBT (24–38 см) → BT (38–72 см) → С (72–100 см).

Профиль темно-серой почвы в разрезе 7:
АО (0–10(11) см) → AU (10(11)–28(30) см) → AUBT (28(30)–40(45) см) → BT (40(45)–67 см) → С (67–100 см).

Профиль серой почвы в разрезе 8: АО (0–7 см) → AY (7–13(15) см) → (AYBT) (13(15)–30(34) см) → BT (30(34)–45 см) → С (45–68 см).

Все лабораторные исследования выполнены в химико-экологической лаборатории Тобольской комплексной научной станции УрО РАН.

Отобранные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, после чего растирали в фарфоровой ступке пестиком и просеивали через сито с диаметром ячеек 1 мм (для анализа элементного состава) и 2 мм (для анализа других физико-химических свойств).

Определяли гранулометрический состав почв по методу Рутковского, массовую долю органического вещества – фотометрическим методом [11].

Для определения валового содержания макроэлементов проводили кислотное разложение проб в системе микроволновой пробоподготовки MWS-2 speedwave (Berghof, Германия). Навеску почвы массой 4,0 г обрабатывали 6 мл конц. HCl и 2 мл конц. HNO₃ («царская водка») в автоклавах DAP-60K. Разложение проводили по трехступенчатой программе: 1) нагрев до 150 °C в течение 10 мин (мощность 80%); 2) выдержка при 180 °C в течение 25 мин (мощность 80%); 3) охлаждение до < 100 °C в течение 10 мин (мощность 40%).

После охлаждения содержимое автоклавов количественно переносили в мерные колбы на 50 мл, доводя объем до метки дистиллированной водой. Ввиду неполного разложения силикатной матрицы суспензии

фильтровали через обеззоленный фильтр «синяя лента». Для минимизации матричных эффектов и приведения концентраций элементов в линейный диапазон калибровки проводили дополнительное разбавление фильтрата в 50 раз.

Определение концентраций элементов (Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, Mn, P) проводили методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре Optima 7000DV (PerkinElmer, США). Измерения выполняли при следующих аналитических длинах волн (нм): Al – 308,215, Fe – 239,562, Mg – 279,077, Ca – 315,887, K – 766,490, Na – 589,592, Mn – 259,372, P – 213,617.

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с помощью программного обеспечения Statistica StatSoft. В качестве описательных статистик использовали медиану, верхний и нижний квартили, минимальное и максимальное значения. При оценке связей между признаками применяли коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Критический уровень статистической значимости принимали равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что в исследованных серых и темно-серых почвах концентрации железа и алюминия закономерно нарастают вниз по профилю (рис. 2), достигая максимума в текстурном горизонте (ВТ) или почвообразующей породе (С). Количественно это выражается в следующих значениях медиан (мг/кг) по генетическим горизонтам (АО-AY(AU)-AYBT(AUBT)-BT-C):

Fe: 19045 → 21750 → 27080 → 34040 → 33110 мг/кг,

Al: 21615 → 23330 → 26285 → 29115 → 30660 мг/кг.

Судя по медианам, содержание Fe в горизонте ВТ по отношению к горизонту АY(AU) составляет 157%, а Al – 125%. Выявленная аккумуляция согласуется с литературными данными [6, с. 81].

В верхних горизонтах серых и темно-серых почв активные процессы разложения органического вещества и гумификации сопровождаются образованием подвижных фульвокислот. Данные соединения разрушают первичные минералы, переводя Fe и Al в подвижные формы, которые мигрируют вниз по профилю с нисходящими токами воды. В текстурном горизонте (ВТ) происходит осаждение мигрирующих соединений, чему способствует изменение фи-

зико-химических условий и более тяжелый гранулометрический состав горизонта: глинистые частицы обладают высокой поглотительной способностью и создают узкопористую структуру, которая задерживает коллоидные взвеси, обогащенные Fe, Al и илистой фракцией. В результате текстурный горизонт уплотняется и приобретает более яркую красно-коричневую окраску, обусловленную аккумуляцией оксидов железа (III). Экспериментальные данные подтверждают высокое содержание глинистой фракции в иллювиальной части профиля – медианные значения по генетическим горизонтам составили: 25 → 21 → 19 → 36 → 34 %. Тяжелые почвы по сравнению с легкими имеют богатый минералогический состав, содержат больше валовых и подвижных элементов [12–14]. Определены положительные корреляции средней силы между содержанием глины и концентрациями Fe ($r = 0,58$) и Al ($r = 0,58$).

Низкое содержание Fe и Al в органогенных горизонтах по сравнению с почвообразующей породой связано со слабой биологической аккумуляцией. Это подтверждается коэффициентами биологического поглощения, не превышающими единицу. Согласно литературным данным [15, с. 64–65] исследованные макроэлементы по интенсивности биологического накопления образуют следующий ряд: P (55) >> Mn (7,0), K (7,0) > Ca (3,0) > Mg (2,9) > Na (0,8) > Al (0,2) > Fe (0,06).

Особенности распределения натрия в серых и темно-серых почвах обусловлены периодически промывным типом водного режима, исключающим аккумуляцию легкорастворимых солей в почвенном профиле. В этих условиях Na, обладающий высокой миграционной способностью, легко выносится за пределы почвенной толщи почвенно-грунтовыми водами. Результаты исследования свидетельствуют о низких концентрациях Na по всему профилю, при этом наблюдается тенденция к росту его содержания с глубиной, что отражается в медианных значениях по генетическим горизонтам: 140 → 128 → 175 → 194 → 246 мг/кг.

В профильном распределении калия не выявлено резкого выноса или аккумуляции в каком-либо горизонте. Его содержание остается относительно стабильным по всему профилю, медианы по горизонтам составили: 3818 → 3105 → 3094 → 4043 → 4150 мг/кг. Будучи ключевым биогенным элементом, K активно поглощается растительностью и возвращается в верхние горизонты с опадом. Этот постоянный цикл

поддерживает его запасы в гумусовой части профиля, компенсируя потенциальные потери от выщелачивания. Значительная часть К входит в состав устойчивых к выветриванию первичных минералов (половых шпатов, слюд), которые служат долговременным «буферным» резервом элемента, особенно в почвообразующей породе. Способность глинистых минералов поглощать

и прочно удерживать ионы К в кристаллической структуре дополнительно иммобилизует элемент, предотвращая его вымывание нисходящими токами влаги. Таким образом, стабильность профильного распределения К является результатом динамического равновесия между его биогенной аккумуляцией в верхних горизонтах и минералогическим запасанием по всей почвенной толще.

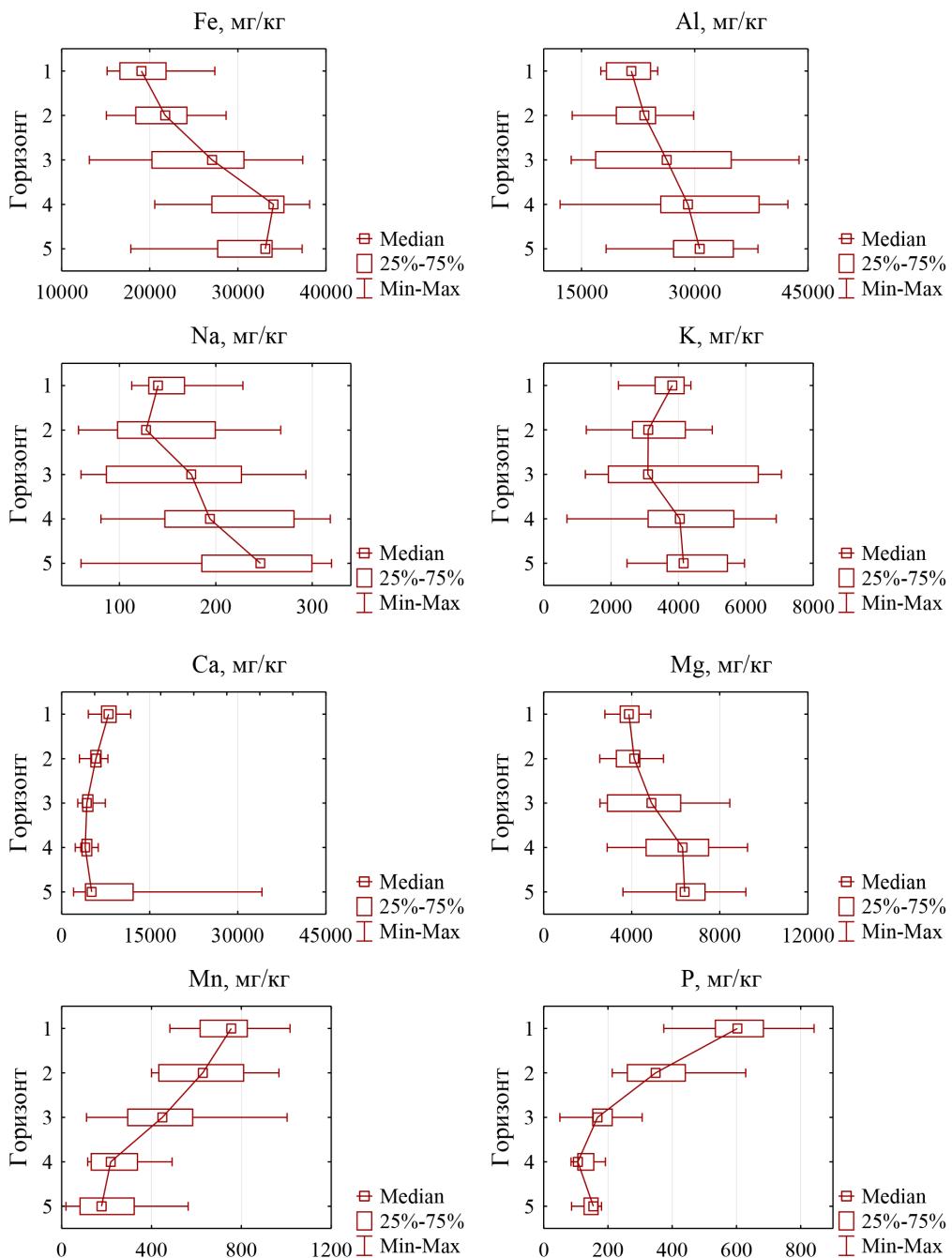


Рис. 2. Содержание макроэлементов в генетических горизонтах серых и темно-серых почв Зауралья (экстракция «царской водкой»).

Горизонты: 1 – грубогумусовый, 2 – серогумусовый (темногумусовый), 3 – серо(темно)гумусово-текстурный, 4 – текстурный, 5 – почвообразующая порода

Характер профильного распределения кальция и магния в исследованных серых и темно-серых почвах существенно различался, несмотря на их принадлежность к элементам среднего биологического накопления [15, с. 65]. Са демонстрировал черты биогенной аккумуляции с максимальными концентрациями в верхних органогенных горизонтах и последующим снижением вниз по профилю (медианы: 8001 → 5835 → 4303 → 4007 → 5111 мг/кг). Однако в почвообразующей породе двух разрезов (№ 6 и 8) зафиксировано резкое увеличение содержания Са до 34120 и 19080 мг/кг соответственно, что объясняется присутствием карбонатных образований, отмеченных при морфологическом описании в виде белых вкраплений диаметром 3–6 мм. В отличие от Са, распределение Mg имело выраженную аккумулятивную тенденцию с постепенным увеличением концентрации с глубиной (медианы: 3874 → 4117 → 4899 → 6312 → 6407 мг/кг), что свидетельствует о его активной миграции в иловую часть профиля.

Установлены тесные положительные корреляции между содержанием органического вещества и концентрациями фосфора ($r = 0,81$) и марганца ($r = 0,73$) в почвенных горизонтах. Наибольшие концентрации этих элементов приурочены к верхним органогенным горизонтам, что количественно отражают медианные значения:

P: 603 → 348 → 168 → 106 → 155 мг/кг,
Mn: 755 → 628 → 448 → 218 → 178 мг/кг,
органическое вещество:
4,2 → 3,8 → 1,9 → 0,7 → 0,7 %.

Данное распределение является классическим примером биогенно-аккумулятивного процесса. Растения поглощают корнями рассеянные в почвенной толще Mn и P, концентрируя их в своей биомассе. Отмоляя, растительные остатки возвращают эти элементы на поверхность почвы в виде концентрированного органического материала. Таким образом, растение, как своеобразный насос, перекачивает химические элементы из нижних горизонтов почвы в верхние.

Фосфор имеет особенно тесную связь с органическим веществом. Значительная часть P в верхних горизонтах представлена органическими формами (в составе гуминовых кислот, фитина и др.), которые отличаются малой подвижностью и не подвергаются активному вымыванию вниз по профилю.

Заключение

На основе проведенного исследования установлены закономерности распределения

макроэлементов в серых и темно-серых почвах Зауралья:

Для железа и алюминия характерно четкое перераспределение по профилю с аккумуляцией в текстурном горизонте (содержание Fe возрастает до 157%, Al – до 125% относительно гумусового горизонта). Этот процесс, связанный с лессиважем, подтверждается корреляцией между содержанием глины и концентрациями Fe и Al.

Фосфор и марганец демонстрируют классическое биогенное накопление в верхних горизонтах, что подтверждается сильной корреляцией с органическим веществом.

Кальций и магний, имея сходные коэффициенты биологического поглощения, проявляют разную миграционную способность: Са аккумулируется в верхней части профиля, тогда как Mg мигрирует в нижние горизонты. Локальные максимумы Са в почвообразующей породе связаны с присутствием в ней карбонатов.

Калий характеризуется относительно равномерным распределением по профилю, что объясняется балансом между биогенной аккумуляцией и минералогическим запасанием в составе первичных и вторичных минералов.

Натрий демонстрирует признаки активного выщелачивания, соответствующего периодически промывному водному режиму исследованных почв.

Список литературы

1. Еремин Д.И., Каюгина С.М. Вариабельность свойств серых лесных почв Зауралья. Тюмень: НИИСХ СЗ – филиал ТюмНИЦ СО РАН, 2024. 202 с. EDN: JXSMWC. ISBN 978-5-4266-0227-4.
2. Национальный атлас почв Российской Федерации / под общей ред. С.А. Шобы. М.: Астрель, 2011. 632 с. ISBN 978-5-271-37461-6.
3. Мамонтов В.Г. Химия почв: учебное пособие / 2-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2025. 272 с. ISBN 978-5-16-019227-7.
4. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с. EDN: PTEEQE. ISBN 5-93520-044-9.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Тюменская область. [Электронный ресурс]. URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/egrpr.php?show=RUREG&ValueID=1026> (дата обращения: 25.11.2025).
6. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. 286 с. ISBN 5-02-029556-6.
7. Каюгина С.М., Еремин Д.И. Физико-химические свойства серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2022. Т. 15. № 4. С. 471–490. DOI: 10.17516/1997-1389-0399. EDN: YOCLPO.
8. Ренев Е.П., Еремин Д.И., Еремина Д.В. Оценка основных показателей плодородия почв наиболее пригодных для расширения пахотных угодий в Тюменской области // До-

- стижения науки и техники АПК, 2017. Т. 31. № 4. С. 27–31. EDN: YOSHUB.
9. Котченко С.Г., Груздева Н.А., Еремин Д.И. Динамика химических свойств серой лесной почвы Северного Зауралья при интенсивном ее использовании в пашне // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 11 (181). С. 49–56. EDN: BRVIBM.
10. Каюгина С.М., Еремин Д.И. Гумусированность серых лесных почв Северного Зауралья в разрезе подтипов и разновидностей по гранулометрическому составу // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5 (103). С. 15–19. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-15-20. EDN: IUOXOI.
11. ГОСТ 26213-2021 Почвы. Методы определения органического вещества [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180714> (дата обращения: 22.11.2025).
12. Земцова Е.С. Оценка уровня загрязнения почв и донных отложений тяжелыми металлами // Агрохимический вестник. 2023. № 4. С. 95–99. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-4-016. EDN: SWPPYY.
13. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. DOI: 10.1134/S0032180X19020114. EDN: ZADGVN.
14. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026. DOI: 10.1134/S0032180X19080045. EDN: FOWRZK.
15. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрея-2000, 1999. 610 с.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы ФНИ: «Экологово-геохимические преобразования почв экосистем Обь-Иртышского бассейна под воздействием природных и техногенных факторов» (Рег. № 1024023000029-9-1.5.4).

Financing: The work was carried out within the framework of the topic of fundamental scientific research: «Ecological and geochemical transformations of soils of ecosystems of the Ob-Irtysh basin under the influence of natural and man-made factors» (Reg. no. 1024023000029-9-1.5.4).