

## Картирование биодоступного $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в Южном Зауралье

А. В. Епимахов<sup>1</sup>, И. В. Чечушков<sup>1</sup>, Д. В. Киселева<sup>2</sup>, М. Н. Анкушев<sup>3</sup>, П. С. Анкушева<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, e-mail: epimakhovav@susu.ru

<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: podarenka@mail.ru

<sup>3</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, 456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: ankushev\_maksim@mail.ru

<sup>4</sup>Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 69, e-mail: polenke@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022 г., принята к печати 19.05.2023 г.

**Объект исследования.** Пространственное распределение значений биодоступного стронция на территории Южного Зауралья. **Цель.** Разработка и апробация методики создания карты естественных значений, пригодной для диагностирования миграций и мобильности в бронзовом веке на примере Южного Зауралья. **Методы.** Пробоотбор осуществлен в 73 основных локациях, расположенных равномерной сетью с шагом в  $25 \pm 5$  км, а также в 22 дополнительных (трансекты по промежуточным линиям в местах сложного геологического строения). Определение содержания стронция проведено методом ICP-MS. Измерения изотопного состава стронция осуществляли на магнитосекторном мультиколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (MC-ICP-MS). Статистический анализ включал метод “Диаграмма стебель и листья”, *t*-критерий Стьюдента, обычный кригинг (кригинг с неизвестным средним) с линейной вариограммой; корреляцию по критерию Пирсона. **Результаты.** Площадь обследования составила 36 тыс. км<sup>2</sup>. Выборка охватила 357 образцов. Выборки по разным типам образцов имеют близкие средние и медианные значения, различия между которыми начинаются в четвертом дробном разряде. Критерий 1 ( $p \geq 0.001$ ) может быть использован для определения локальной вариативности, критерий 2 ( $0.706 < p < 0.716$ ) – при оценке происхождения древних индивидов, животных и археологических объектов. Построены карты интерполированных значений по каждому типу образцов в паре с картой ошибок интерполяции. Все карты биодоступного стронция демонстрируют сходные пространственные закономерности. Кросс-валидация выявила участки наименьшей точности. **Выводы.** Сходство распределения аномалий на картах различных типов образцов подтверждает правильность выбранной методики отбора проб. Наблюдается явная тенденция приуроченности зон повышенных значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  к древним толщам (среднее – 0.7106), а пониженных ( $0.7091 \pm 0.002$ ) – к более молодым. С учетом дробного геологического строения и широкого спектра горных пород исследуемой территории положительным результатом является низкая дифференциация зональности выявленных аномалий, которые соответствуют крупным структурно-формационным зонам Урала. Изложенная методика демонстрирует пригодность для исследований субширотных миграций древнего населения Южного Зауралья.

**Ключевые слова:** изотопы  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , изоскейты, Урал, бронзовый век, миграции людей

### Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-18-00402-П “Миграции человеческих коллективов и индивидуальная мобильность в рамках мультидисциплинарного анализа археологической информации (бронзовый век Южного Урала)”

## Mapping of bioavailable $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the Southern Trans-Urals

Andrey V. Epimakhov<sup>1</sup>, Igor V. Chechushkov<sup>1</sup>, Darya V. Kiseleva<sup>2</sup>,  
Maksim N. Ankushev<sup>3</sup>, Polina S. Ankusheva<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>South Ural State University, 76 Lenin av., Chelyabinsk 454080, Russia, e-mail: epimakhovav@susu.ru

<sup>2</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: podarenka@mail.ru

<sup>3</sup>South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Institute of Mineralogy, Ilmeny Reserve Area, Miass, Chelyabinsk region 456317, Russia, e-mail: ankushev\_maksim@mail.ru

<sup>4</sup>South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 69 Lenin av., Chelyabinsk 454080, Russia, e-mail: polenke@yandex.ru

Received 27.09.2022, accepted 19.05.2023

**Для цитирования:** Епимахов А.В., Чечушков И.В., Киселева Д.В., Анкушев М.Н., Анкушева П.С. (2023) Картирование биодоступного  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в Южном Зауралье. *Литосфера*, 23(6), 1079–1094. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-6-1079-1094>

**For citation:** Epimakhov A.V., Chechushkov I.V., Kiseleva D.V., Ankushev M.N., Ankusheva P.S. (2023) Mapping of bioavailable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in the Southern Trans-Urals. *Lithosphere (Russia)*, 23(6), 1079–1094. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-6-1079-1094>

© А.В. Епимахов, И.В. Чечушков, Д.В. Киселева, М.Н. Анкушев, П.С. Анкушева, 2023

**Research subject.** Spatial distribution of bioavailable strontium in the South Trans-Urals. **Aim.** Development and test of a methodology for obtaining a bioavailable strontium map suitable for studying migrations and mobility in the Bronze Age in the Southern Trans-Urals. **Methods.** Sampling was conducted in 73 loci located in a uniform network in a  $25 \pm 5$  km grid and in 22 additional loci (transects along the intermediate lines in places of complex geological structure). The determination of strontium content was carried out by the ICP-MS method. The strontium isotope composition was measured using an inductively coupled plasma magneto-sector multi-collector mass spectrometer (MC-ICP-MS). Statistical methods included analysis with stem-and-leaf plots; Student's *t*-test; ordinary kriging (the mean is unknown) with linear semivariogram; analysis of correlation according to Pearson's test. **Results.** The surveyed area is 36 sq. km<sup>2</sup>. The sample size is 357. Samples for different types have similar mean and median values; the differences occur in the fourth fractional digit. Criterion 1 ( $n \geq 0.001$ ) can be used to determine local variability, and Criterion 2 ( $0.706 < n < 0.716$ ) can be used to assess the origin of ancient individuals, animals, and archaeological objects. The interpolated maps for each sample type were created. All bioavailable strontium maps show similar spatial patterns. Cross-validation revealed areas of the lowest accuracy. **Conclusions.** The similarity of the distribution of anomalies on the maps of different types suggests the feasibility of the sampling technique. There is a clear tendency for the zones of elevated  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values to be associated with the older lithology (0.7106, mean). The lower values ( $0.7091 \pm 0.002$ ) are associated with the younger lithology. Given the complex geological structure and a wide range of rocks in the study area, a positive result is the low differentiation of the zoning of the identified anomalies, which correspond to large structural-formation zones of the Urals. The presented method demonstrates its suitability for studying sublatitudinal migrations of the ancient population of the Southern Trans-Urals.

**Keywords:** strontium isotopes, isoscapes, Urals, Bronze Age, human migrations

#### Funding information

The work was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 20-18-00402-II "The multidisciplinary analysis of group migration and individual mobility in the light of archaeological data (case study of the Bronze Age of the Southern Urals)"

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение миграций и мобильности методами геохимии вошло в практику археологии несколько десятилетий назад. Несмотря на многочисленные коррекции методики, принципы такого исследования остаются неизменными, а результаты востребованными (Slovak, Paytan, 2011). В последние годы миграционная тематика переживает бум благодаря широкому применению методов палеогенетики и геохимии (Kristiansen, 2022). Именно они позволили диагностировать трансевразийские миграции бронзового века, важной частью которых было население Южного Урала. Одним из самых ярких феноменов этого периода являются синташтинские древности и секвенция связанных с ними археологических культур (Koryakova, Epimakhov, 2014). По сути, синташтинские стереотипы определили культурный облик огромной территории аридной части Евразии на протяжении всего II тыс. до н. э. На очень компактной территории Южного Зауралья выявлены серия поселений с замкнутой планировкой и сопровождающие их могильники, датируемые началом II тыс. до н. э. За пределами Южного Зауралья такие поселения отсутствуют. Если в вопросе миграционного происхождения синташтинской традиции царит относительное единодушие, то в остальном существует много разногласий, включая проблемы поиска исходной зоны миграции, компонентов миграционного потока, причин формирования сложной общественной системы, не имеющей синхронных аналогов в аридной части Евразии и пр.

Столь же проблематичным остается моделирование хозяйственной деятельности этой группы. Установлено, что основной отраслью жизнеобеспечения являлось комплексное животноводство, следы земледелия не обнаружены. Материалы поселений и могильников иллюстрируют знакомство этой группы с колесным транспортом и металлургией меди. В той или иной степени документированы все этапы производственного цикла – от добычи руды до готовых изделий. Кроме того, археологические и археозоологические данные позволяют предполагать, что модель системы жизнеобеспечения и социальная организация эволюционировали в течение бронзового века, хотя элементы стационарного обитания сохранялись в течение всего II тыс. до н. э. (калиброванная радиоуглеродная шкала). Все перечисленное предполагает локальную мобильность, масштабы которой могут быть оценены только методами геохимии. Таким образом, территория Южного Зауралья может быть использована в качестве модели для решения целого ряда важных вопросов реконструкции истории бронзового века.

Главным препятствием на этом пути является отсутствие карт соотношения фоновых значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для данной территории с крайне неоднородным геологическим строением и, следовательно, возможностью диагностирования различий в фоновых значениях. Исследование локальных зон, прилегающих к археологическим объектам, и сопоставление фоновых значений с материалами археологических коллекций позволяют решать только частные задачи и различить местные и неместные организмы.

По этим причинам целью данной работы стало построение карт фоновых значений биодоступного стронция. Для ее реализации разработана методика пробоотбора, проанализированы разнотипные образцы из одних и тех же локаций, использована совокупность статистических процедур для построения карты и оценки достоверности результатов. Полученные изоскейпы (англ. *isoscape*, *iso* – isotope, *scape* – land-scape (West et al., 2008)) сопоставлены с геологической структурой региона.

### Краткая геологическая характеристика территории

Изотопный состав стронция в различных горных породах и минералах зависит от их возраста и соотношения Rb/Sr. Древние породы с высокими значениями отношения Rb/Sr будут характеризоваться высокими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , более молодые породы с низкими значениями отношения Rb/Sr, наоборот, показывают более низкие значения отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Фоп, 1989). В изучении происхождения и миграции древних сообществ используется изотопная подпись  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , которая наследуется по цепочке: коренная порода – кора выветривания – почва – растения – животные – человек, при этом значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  могут изменяться, например, при воздействии атмосферных осадков (Price et al., 2002).

Исследуемая территория покрывает четыре крупные структурно-формационные зоны Урала, отличающиеся друг от друга генезисом, возрастом и составом слагающих горных пород. На западе сетка отбора образцов касается Центрально-Уральской мегазоны, сложенной в различной степени метаморфизованными отложениями верхнего докембрия – нижнего палеозоя (рис. 1). Горные породы представлены катагенетически измененными осадочными толщами и высокометаморфизованными кристаллическими комплексами. Восточнее находится Тагило-Магнитогорская мегазона, сложенная палеозойскими островодужными вулканогенно-осадочными формациями. Далее на восток сетка пересекает Восточно-Уральскую мегазону, которая представляет собой коллаж микроконтинентальных блоков, расчлененных офиолитовыми и островодужными формациями. Сложное геологическое строение зоны включает в себя ордовикские ультрабазитовые комплексы, гранитные интрузивы каменноугольного и пермского возраста, палеозойские вулканогенно-осадочные толщи, ордовикские метаморфические комплексы. Восточная граница сетки отбора проб лежит в пределах Зауральской мегазоны, сложенной ордовикскими вулканитами, силурийскими метаморфическими комплексами, девон-каменноугольными палеостроводужными вулканогенно-осадочными комплексами и известково-щелочными образования-

ми (Пучков, 2000). Восточнее древние комплексы перекрыты осадочным чехлом Западно-Сибирской платформы.

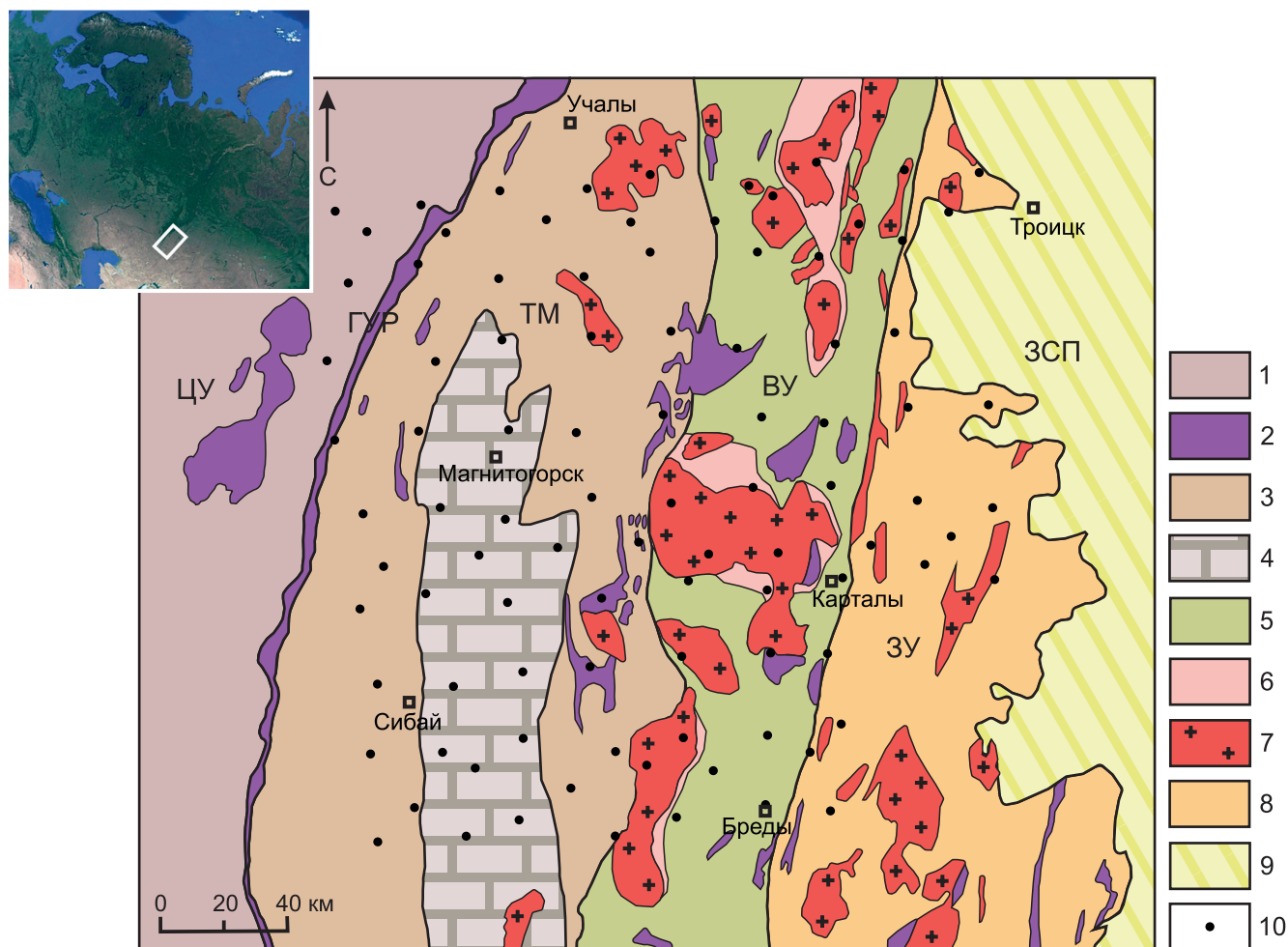
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Методика пробоотбора

Границы участка обследования выбраны исходя из распространения синташтинских памятников. Зона исследования определена южнее р. Уй, она проходит по границе Челябинской области с Республикой Казахстан на востоке и заходит в Республику Башкортостан на западе и Оренбургскую область на юге. Эта территория хорошо обследована с точки зрения археологии и характеризуется сложным геологическим строением. Отбор образцов осуществлен в 73 локациях, расположенных равномерной сетью с шагом в  $25 \pm 5$  км, позволяющей в дальнейшем интерполировать карту зонирования значений изотопа. Выбор конкретной точки отбора в пределах буферной зоны происходил с расчетом обеспечения максимального разнообразия образцов. Площадь обследования составила более 36 тыс. км<sup>2</sup>. После получения лабораторных данных результаты измерений были сопоставлены с координатами точек отбора. На этом основании методом обычного кригинга (Journel, 1989; Isaaks, Srivastava, 1989) интерполированы карты значений. Для проверки интерполированных значений на участках с дробным геологическим делением также проложено три линейные трансекты по промежуточным линиям карты (дополнительно 22 локации), затем также использованные для построения результирующих карт.

В целях определения репрезентативности типов образцов и оценки локальной вариативности в каждой локации отобрано от двух до четырех разных типов в зависимости от их локальной доступности: растительность, почва, вода, раковины моллюсков. Сбор образцов проводился по возможности на удалении от промышленно активных населенных пунктов, возделываемых полей и сельскохозяйственных угодий, потенциальным источником стронция с измененным изотопным составом на которых могут служить удобрения (Maurer et al., 2012; Thomsen, Andreasen, 2019). Поскольку обводненность территории не слишком высока, универсальными источниками стали местная растительность и почва горизонта А.

Собраны травянистые растения одного вида – полынь горькая (*Artemisia absinthium*). Поверхностный почвенный слой, в зависимости от мощности, собран с глубины до 10 см, где расположена основная масса корней растений. Поверхностная вода отбиралась из постоянных и временных водотоков, из крупных рек Южного Зауралья (Урал, Уй, Гумбейка, Сикташта, Караталы-Аят, Карагайлы-Аят,



**Рис. 1.** Схема геологического строения Южного Урала с сеткой отбора проб, по (Козлов и др., 2002).

1 – докембрийские и палеозойские метаморфические комплексы; 2 – палеозойские офиолитовые ультрабазит-базитовые комплексы; 3 – девон-каменноугольные вулканогенно-осадочные комплексы; 4 – каменноугольные известняки и вулканогенно-осадочные комплексы; 5 – палеозойские метаморфические и вулканогенные комплексы; 6 – протерозойские вулканы и гранитогнейсы; 7 – каменноугольно-пермские гранитные интрузивы; 8 – протерозой-палеозойские вулканогенно-осадочные комплексы; 9 – мезозой-кайнозойские осадочные комплексы; 10 – точки отбора проб растений. Основные структурно-формационные зоны Урала: ЦУ – Центрально-Уральская мегазона, ГУР – зона Главного Уральского разлома, ТМ – Тагил-Магнитогорская мегазона, ВУ – Восточно-Уральская мегазона, ЗУ – Зауральская мегазона, ЗСП – Западно-Сибирская платформа.

**Fig. 1.** Scheme of the Southern Ural geological structure with a sampling grid according to (Kozlov et al., 2002).

1 – Precambrian and Paleozoic metamorphic complexes; 2 – Paleozoic ophiolite ultramafic-mafic complexes; 3 – Devonian-Carboniferous volcanogenic-sedimentary complexes; 4 – Carboniferous limestones and volcanic-sedimentary complexes; 5 – Paleozoic metamorphic and volcanogenic complexes; 6 – Proterozoic volcanic rocks and granite-gneisses; 7 – Carboniferous-Permian granite intrusions; 8 – Proterozoic-Paleozoic volcanogenic-sedimentary complexes; 9 – Mesozoic-Cenozoic sedimentary complexes; 10 – plant sampling points. The main structural-formation zones of the Urals are: ЦУ – Central Ural megazone, ГУР – Main Ural Fault zone, ТМ – Tagil-Magnitogorsk megazone, ВУ – East Ural megazone, ЗУ – Trans-Ural megazone, ЗСП – West Siberian Platform.

Нижний Тогузак) и их притоков, ряда озер естественного и искусственного происхождения. Несколько образцов подземной воды взято из родников. Раковины моллюсков различных видов (прудовик обыкновенный (*Lymnaea stagnalis*), катушки различных видов (*Planorbidae*), живородка речная (*Viviparus contectus*), беззубка обыкновенная

(*Anodonta cygnea*), перловица обыкновенная (*Unio pictorum*)) отобраны непосредственно из среды обитания. Видовая вариативность моллюсков обусловлена различными биогеоценозами (реки, пруды, озера и др.) и ареалами их распространения.

Координаты точек отбора фиксировались при помощи GPS-приемника Garmin GPSmap 62s.



Окрестности мест сбора образцов фиксировались фотографически. Таким образом, выборка включает 357 образцов из 95 локаций.

### Методика анализа проб

Анализ изотопного состава стронция проведен в блоке чистых помещений (классы 6 и 7 ИСО) ЦКП “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). Предварительно очищенные при помощи уксусной кислоты образцы раковин моллюсков (Corti et al., 2013), а также очищенные в деионизованной воде и озоленные пробы растительности растворяли открытым способом в концентрированной  $\text{HNO}_3$  с добавлением  $\text{H}_2\text{O}_2$  на электрической плитке при  $150^\circ\text{C}$  (Snoeck et al., 2020). К образцам воды добавляли концентрированную азотную кислоту и фильтровали. Для получения водных вытяжек предварительно растертые пробы почвы массой 1 г отбирали в полипропиленовые контейнеры, добавляли 10 мл ультрачистой воды и встряхивали в шейкере в течение 1 ч, после чего фильтровали через мембранные ацетат-целлюлозные фильтрующие насадки с диаметром пор 0.2 мкм (Maurer et al., 2012).

Во всех образцах проводили определение содержания стронция методом ICP-MS (NexION 300S). Затем объем пробы, соответствующий содержанию 600 нг стронция, выпаривали на электрической плитке при  $120^\circ\text{C}$ , осадок растворяли в 7М  $\text{HNO}_3$ . Растворы проб центрифугировали при 6000 об/мин и проводили хроматографическое выделение стронция на смоле SR (Triskem) по одностадийной схеме (Muyndk et al., 2009; Kasyanova et al., 2019). Измерения изотопного состава стронция проводили на магнитосекторном мультиколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (MC-ICP-MS) Neptune Plus. Для коррекции масс-дискриминации использовали комбинацию бреккетинга и нормализации по экспоненциальному закону  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ . Результаты дополнительно корректировались методом бреккетинга с использованием изотопного стандарта карбоната стронция NIST SRM 987 на среднюю величину отклонения от референтного значения 0.710245 (согласно базе данных GeoReM (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)) для каждой двух проб, “взятых в вилку” между измерениями NIST SRM 987.

Для контроля измерений изотопного состава стронция изотопный стандарт NIST SRM 987 регулярно измерялся на протяжении длительного времени (в течение 2020–2021 гг.):  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71025$ ,  $2\text{SD} = 0.00012$  (104 измерения в двух параллелях). Неопределенность в условиях внутрилабораторной воспроизводимости ( $2\sigma$ ) для NIST SRM-987 составила  $\pm 0.003\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе проведенных анализов нами создана база данных по исследуемой территории, которая включает в себя следующие параметры: № зоны, координаты центра зоны, краткое описание геологического строения зоны, краткое описание геологического строения точки отбора неподвижных образцов (почва и растение) с геохронологической характеристикой, значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для всех типов образцов (почва, растения, вода, раковины моллюсков). Исходные данные опубликованы в репозитории естественно-научных данных Pangaea (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.950380>).

### Статистический анализ измерений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Статистический анализ значений биодоступного стронция без учета их местоположения является первым этапом исследования. Его задачи заключаются в следующем:

- выявление и сравнение средних тенденций и внутренней вариативности значений каждой из полученных выборок;
- сравнение и определение вариативности значений, полученных в одноименных локациях по различным типам образцов;
- определение порога значимости локальной вариативности значений в пределах изучаемых выборок.

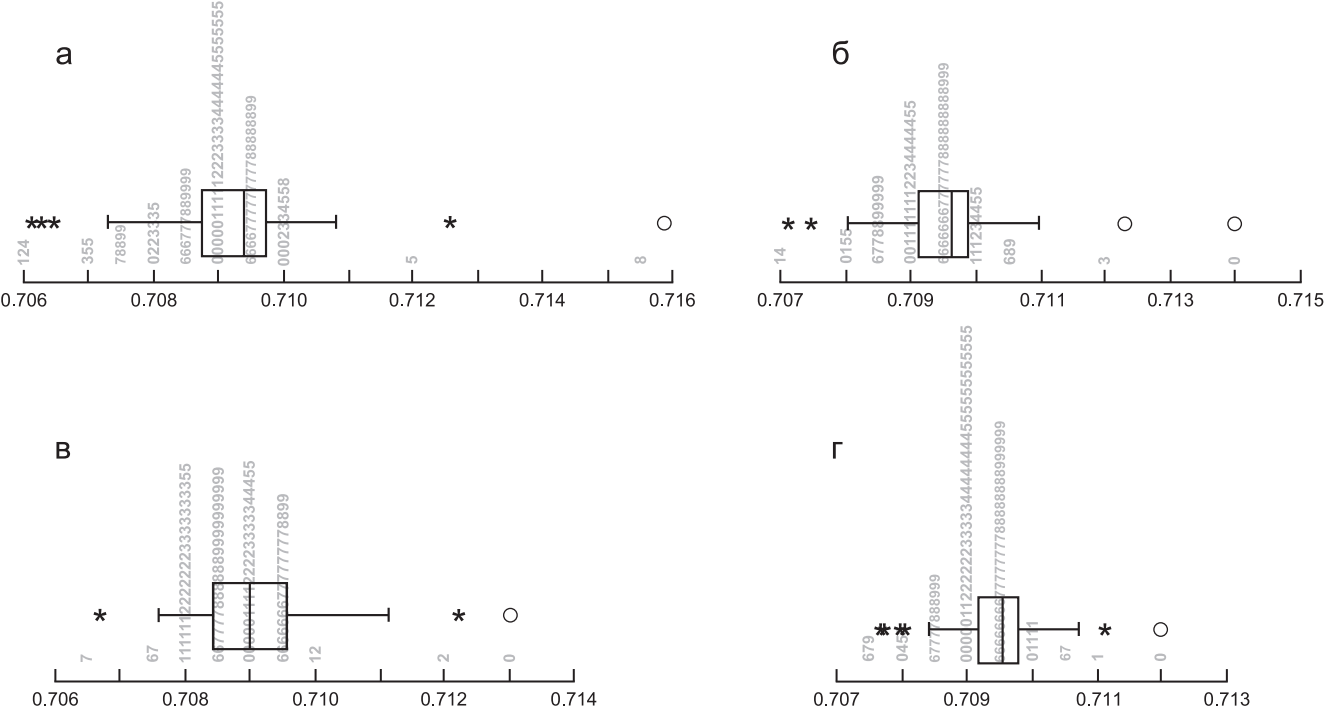
Статистические характеристики выборок приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Выборка по образцам воды состоит из 93 значений (см. рис. 2а). Диаграмма “стебель и листья” показывает, что выборка формирует колоколовидную фигуру с одной вершиной, близкую к нормальному распределению. Среднее арифметическое составляет  $0.7093 \pm 0.0002$  (95%-й доверительный интервал (ДИ)). Выборка имеет наибольший разбег значений из всех четырех, составляющий 0.0097. Поскольку отбор велся как из стоячих ( $n = 32$ ), так и текущих ( $n = 61$ ) источников воды, проведена проверка различия между средними значениями этих двух типов образцов. Нуль-гипотеза заключалась в том, что тип источника воды не является независимой переменной при измерении изотопных соотношений и может быть проигнорирован. Для проверки нуль-гипотезы был проведен анализ по  $t$ -критерию Стьюдента для двух выборок, он показал наличие статистически недостоверного различия средних значений ( $t = 1.3$ ,  $p = 0.17$ ). Это позволяет предполагать, что различные типы источников воды имеют сходные значения и могут быть использованы при изотопном картировании, хотя широкая вариативность значений заставляет относиться к полученным результатам с осторожностью.

Образцы моллюсков составляют выборку из 74 значений (см. рис. 2б). Распределение значений

**Таблица 1.** Описательная статистика измеренных значений биодоступного стронция по четырем типам образцов  
**Table 1.** Descriptive statistics of measured strontium values across four sample types

Параметр	Вода	Раковины моллюсков	Почвенная вытяжка	Растение ( <i>Artemisia absinthium</i> )
n	93	74	95	95
Минимум	0.7061	0.7071	0.7067	0.7077
Максимум	0.7159	0.7141	0.713	0.7120
Разбег значений	0.0097	0.0069	0.006	0.0043
Среднее	0.7093	0.7096	0.709	0.7094
Среднеквадратическое отклонение	0.0012	0.0009	0.0008	0.0006
± 1 стандартная ошибка при 95%-м ДИ	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001
Медиана	0.7094	0.7096	0.7089	0.7095



**Рис. 2.** Комбинированные диаграммы “Ствол и листья” и размаха значений <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в образцах воды (а), моллюсков (б), почвы (в), дикорастущих трав (г).

**Fig. 2.** Combined stem-and-leaf plots and the box plots range of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr values in the samples of water (a), mollusks (б), soil (в), wild herbs (r).

формирует колоколовидную фигуру с одной вершиной со шлейфом в большую сторону, но близкую нормальному распределению со средним  $0.7096 \pm \pm 0.0002$  (95%-й ДИ). Разница между наименьшим и наибольшим значением составляет 0.0069, т. е. вариативность значений меньше, чем в образцах воды. Почвенные образцы имеют 95 измерений (см. рис. 2в). Распределение колоколовидной формы со шлейфом в большую сторону, но значения достаточно плотно сгруппированы у медианы. Среднее

арифметическое –  $0.709 \pm 0.0001$  (95%-й ДИ) при вариативности самой выборки 0.006. Наконец, выборка значений по образцам дикорастущих трав состоит из 95 показаний (см. рис. 2г). Она формирует колоколовидную фигуру с одной вершиной, близкую нормальному распределению. Среднее арифметическое –  $0.7094 \pm 0.0001$  (95%-й ДИ), а разбег значений в этой выборке наименьший – 0.0043, что свидетельствует о наименьшей вариативности.

Таким образом, все полученные выборки имеют близкие средние и медианные значения (см. табл. 1), различия между которыми начинаются в четвертом дробном разряде, в то время как различия между минимальными и максимальными значениями – уже в сотых долях. Это позволяет предположить, что вариативность тысячных долей определяет локальные значения, а последующими знаками так или иначе можно пренебречь как не влияющими на изменения десятых и сотых долей. Таким образом, критерий  $p \leq 0.001$  может быть избран как для определения локальной вариативности, так и для последующего определения точности интерполяции карт, где  $n$  – максимально допустимая разница в значениях образцов из одного ареала. При этом округление десятичных долей может быть проблематичным, если реальное значение  $p < 0.001$ .

Кроме того, измеренные значения соотношений изотопов стронция лежат в пределах 0.7061–0.7159 ( $n = 357$ ), т. е. вариативность определяется как  $0.706 < p < 0.716$ . Другими словами, гипотетический результат, где  $p < 0.706$  или  $p > 0.716$  будет свидетельствовать о не южно-уральском источнике происхождения анализируемого природного образца.

Эти критерии (критерий 1:  $p \geq 0.001$ ; критерий 2:  $0.706 < p < 0.716$ ) могут быть использованы при оценке вероятного ареала происхождения древних индивидов, животных и археологических объектов в границах созданной карты фоновых значений.

Следующим этапом анализа является попарное сравнение выборок методом  $t$ -статистики по критерию Стьюдента (табл. 2).

Сравнение показывает, что во всех случаях разница средних значений составляет  $d < 0.0005$ , при этом статистически достоверная разница средних зафиксирована для трех из шести пар: вода/моллюски ( $p = 0.05$ ), моллюски/почва ( $p = 0.002$ ), растения/почва ( $p = 0.0009$ ). Это может свидетельствовать о незначительной локальной вариативности измеренных значений разных типов образцов.

Для проверки этой гипотезы сравним значения, полученные в тождественных точках сбора. Так, для пары моллюски/почва разница варьируется в пределах от  $-0.001$  до  $0.002$ , при этом критерию  $p \leq 0.001$  не отвечают 8 значений из 55, т. е. совпадение составляет 85%. В паре растения/почва различия лежат в пределах от  $-0.0004$  до  $0.002$ , но выпадают за критический предел лишь 9 из 69 (87% совпадений). В паре вода/моллюски в сериях, собранных по основной сетке пробоотбора в 2020 г., разница варьируется в пределах от  $-0.0006$  до  $0.0004$ , т. е. несмотря на то что средние значения выборок отличаются, попарное сравнение показывает отсутствие критической разницы в значениях. Таким образом, можно предполагать, что даже при существовании вариативности между разными типами образцов все выборки репрезентативно отражают локальные значения стронция и могут быть использованы для картирования.

В заключение следует отметить, что анализ данных выявил аномалии самой выборки. Так, приведенный выше анализ разницы значений в тождественных точках сбора не демонстрирует столь же высокой степени сходства в выборке, полученной и измеренной в 2021 г. В этих данных критерию  $p \leq 0.001$  не отвечают 41% значений (54/132). Налицо разница между двумя выборками, собранными и изученными в разное время. В 2020 г. сбор осуществлялся в августе–сентябре, а в 2021 г. – в сентябре. Приборная и лабораторная база за этот период не менялась. Более того, метод бреккетинга (“взятия в вилку”) подразумевает постоянное измерение изотопного стандартного образца с контролем воспроизводимости его паспортного значения изотопного отношения. По всей вероятности, подобная разница между выборками 2020 и 2021 гг. может быть обусловлена воздействием переменных климатических факторов, таких как количество сухих и влажных осадков, течением педогенных процессов, в общем случае слабо поддающихся учету и обеспечивающих статистические флуктуации полученных результатов (Bataille et al., 2020).

### Интерполяция региональных карт распределения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Для интерполяции первичной карты вариаций изотопов стронция использован метод обычного кригинга (кригинг с неизвестным средним) с линейной вариограммой (Oliver, 1990; Malainey, 2011). Выбор метода интерполяции представляется оправданным, поскольку предполагается, что данные обладают двумя фундаментальными характеристиками: автокорреляцией и пространственным смещением. Размер ячейки каждой интерполированной карты составляет  $5 \times 5$  км. Репрезентативность обеспечена выбором образцов методом случайного поиска, а надежность полученных резуль-

**Таблица 2.** Результаты сравнения выборок методом  $t$ -статистики по критерию Стьюдента по выборке 2020 г. (объединенная дисперсия)

**Table 2.** Comparison of samples with the Student's  $t$ -statistic for the 2020 sample (pooled variance)

Пара образцов	Разница средних	t	p
Вода/растения	0.0003	–1.63	0.1
Вода/моллюски	0.0003	–1.91	0.05
Вода/почва	0.0001	0.62	0.53
Моллюски/почва	0.0004	3.13	0.002
Растения/почва	0.0004	3.41	0.0009
Растения/моллюски	0.0001	–0.53	0.59

татов проверена при помощи кросс-валидации (интерполяция известных значений по предсказанным и вычисление разницы между известным и интерполированными данными).

Результирующими стали карты интерполированных значений по каждому типу образцов в паре с картой ошибок интерполяции. Пороговым значением для ошибки был принят критерий  $n \geq 0.001$ . Кроме того, данные по выборкам воды, растений и почвы использованы для интерполяции усредненной карты. Данные интерполированных карт для каждого типа образцов, а также среднее по четырем типам доступны в форматах KML, через репозиторий научных данных Zenodo (Chechushkov et al., 2022). Все полученные карты биодоступного стронция демонстрируют сходные пространственные закономерности: значения изменяются в широтном направлении с высокими значениями

в Центрально-Уральской мегазоне, которые затем резко понижаются в Тагило-Магнитогорской мегазоне (табл. 3). Наиболее выражены различия между Тагило-Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазонами, которые также полнее покрыты сеткой отбора. Тем не менее карты повторяют друг друга не полностью, отражая особенности накопления изотопов стронция в каждом из типов образцов, поэтому опишем их по отдельности.

1. Карта по образцам воды (рис. 3) построена с использованием всех доступных измерений ( $n = 93$ ). В Центрально-Уральской мегазоне сконцентрированы точки с наиболее высокими и наиболее низкими значениями стронция. Среднее измеренных значений –  $0.7061 \pm 0.004$  (95%-й ДИ), достаточно большое среднееквадратическое отклонение (0.0037) показывает большую вариативность значений. Очевидная граница на востоке сов-

**Таблица 3.** Описательная статистика измеренных значений биодоступного стронция по разным типам образцов с разделением по геологическим зонам

**Table 3.** Descriptive statistics of strontium values for different types of samples by geological zones

Параметр	Центрально-Уральская мегазона	Тагило-Магнитогорская мегазона	Восточно-Уральская мегазона	Зауральская мегазона
Средние значения по воде				
n	6	44	29	13
Среднее	0.7100	0.7089	0.7096	0.7093
±95%-й ДИ	0.004	0.002	0.004	0.003
Среднеквадратическое отклонение	0.0037	0.0007	0.0009	0.0006
Средние значения по растениям				
n	6	45	29	15
Среднее	0.71043	0.70926	0.70964	0.70953
±95%-й ДИ	0.003	0.0001	0.002	0.003
Среднеквадратическое отклонение	0.0011	0.00055	0.0005	0.0005
Средние значения по моллюскам				
n	1	35	25	12
Среднее	—	0.7091	0.7100	0.7099
±95%-й ДИ	—	0.003	0.002	0.006
Среднеквадратическое отклонение	—	0.0006	0.0005	0.0009
Средние значения по почве				
n	6	45	29	15
Среднее	0.7104	0.7087	0.7091	0.7092
±95%-й ДИ	0.002	0.0002	0.0002	0.0003
Среднеквадратическое отклонение	0.002	0.0006	0.0006	0.0005
Средние значения по воде, растениям и почве				
n	3	31	23	10
Среднее	0.7106	0.7091	0.7096	0.7095
±95%-й ДИ	—	0.003	0.002	0.002
Среднеквадратическое отклонение	—	0.0005	0.0004	0.0002



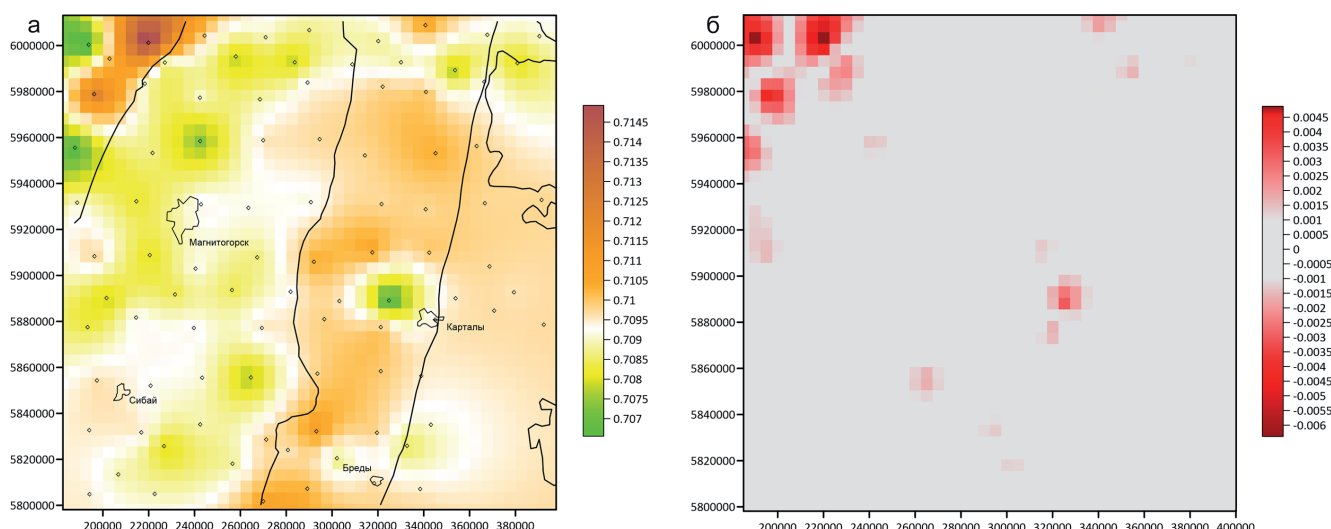


Рис. 3. Образцы воды ( $n = 95$ ).

а – интерполяция зональной изменчивости изотопов стронция методом обычного кригинга по образцам воды; цветовая шкала варьируется от минимального значения к максимальному значению выборки; б – ошибка интерполяции (ошибка = интерполированное значение – наблюдаемое значение).

Fig. 3. Water samples ( $n = 95$ ).

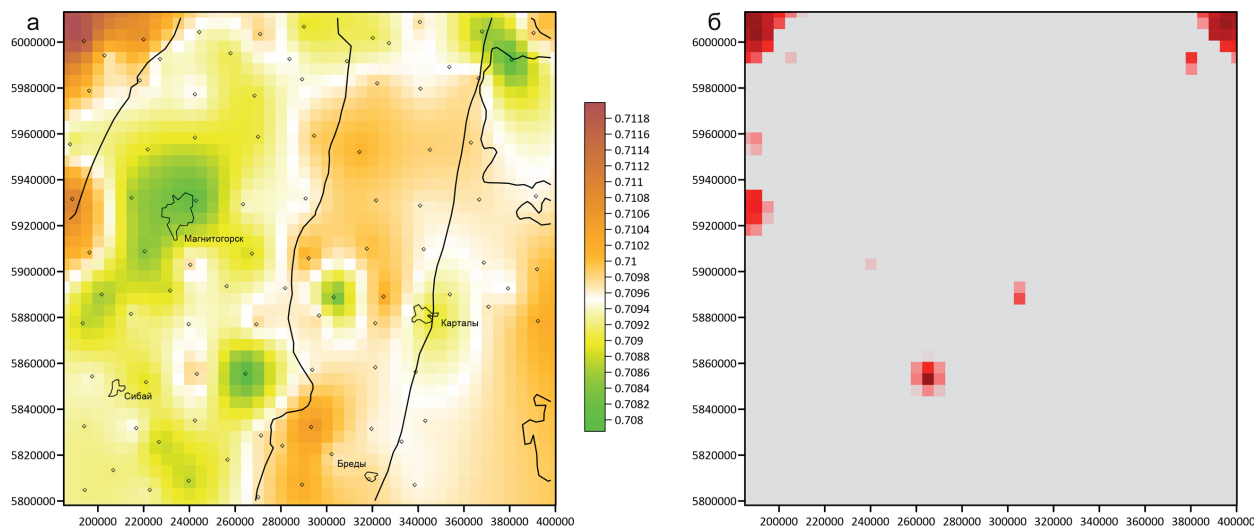
а – interpolation of strontium isotope zonal variability by ordinary kriging from water samples; the color scale varies from the minimum value to the maximum sample value; б – cross validation results (error = interpolated value – observed value).

падает с границей Тагило-Магнитогорской мегазоны. Среднее измеренных значений в ее пределах составляет  $0.7089 \pm 0.002$  (95%-й ДИ) при достаточно низком среднеквадратическом отклонении в 0.0007, напрямую демонстрирующем гомогенность значений в пределах зоны. Низкие значения в пределах этой зоны лежат к северу от г. Магнитогорска (0.7073), а высокие – близ г. Сибай (0.7095). Далее заметная граница более высоких значений проходит к востоку в меридиональном направлении, близко к Восточно-Уральской мегазоне. Среднее измеренных значений в пределах зоны составляет  $0.7096 \pm 0.003$  (95%-й ДИ), при среднеквадратическом отклонении 0.0009. Аномально низкие для зоны значения находятся в ее северной (долина р. Уй), центральной (близ г. Каргалы) и южной (п. Бреды) частях. Необходимо отметить, что две последние аномалии связаны с пробами 2021 г., не подтверждаются значениями по моллюскам и могут являться ошибкой измерения. К востоку значения понижаются, хотя интерполяция не может считаться полностью надежной, так как пробоотбор в данной местности был ограничен государственной границей РФ в Челябинской области. Среднее –  $0.7093 \pm 0.003$  (95%-й ДИ), среднеквадратическое отклонение – 0.0006.

2. Карта по образцам растений ( $n = 95$ ) демонстрирует сходную структуру с картой по воде (рис. 4). В пределах Тагило-Магнитогорской мегазоны низкие значения локализованы близ г. Магни-

тогорска, а также в юго-восточной части зоны. Важно заметить, что аномально низкое значение лежит у прогиба, образованного геологической границей на юго-востоке, и совпадает с интерполяцией по воде. Среднее измеренных значений в пределах зоны –  $0.7092 \pm 0.005$  (95%-й ДИ), среднеквадратическое – 0.0005. К востоку, в пределах Восточно-Уральской мегазоны, значения возрастают, практически совпадая с геологической границей. В пределах зоны относительно более низкие значения лежат на севере по долине р. Уй и в районе г. Каргалы на юге. Среднее –  $0.7096 \pm 0.002$  (95%-й ДИ), среднеквадратическое – 0.0005. Статистические характеристики подтверждают более высокие значения и их высокую гомогенность. Далее к востоку значения незначительно снижаются, условно совпадая с границей Зауральской мегазоны, среднее значение здесь составляет  $0.7095 \pm 0.003$  (95% ДИ), среднеквадратическое – 0.0005.

3. Карта по образцам моллюсков (рис. 5) построена на основании 74 измерений. Единственная локация в Центрально-Уральской мегазоне образует зону высоких значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в северо-западном углу карты, однако ближайшие значения на границе Тагило-Магнитогорской мегазоны подчеркивают ее, показывая постепенное уменьшение к востоку. Аномально низкие значения лежат в районе Магнитогорска, а также в юго-восточной части Тагило-Магнитогорской мегазоны, повторяя паттерн по образцам воды и растений. Для этой

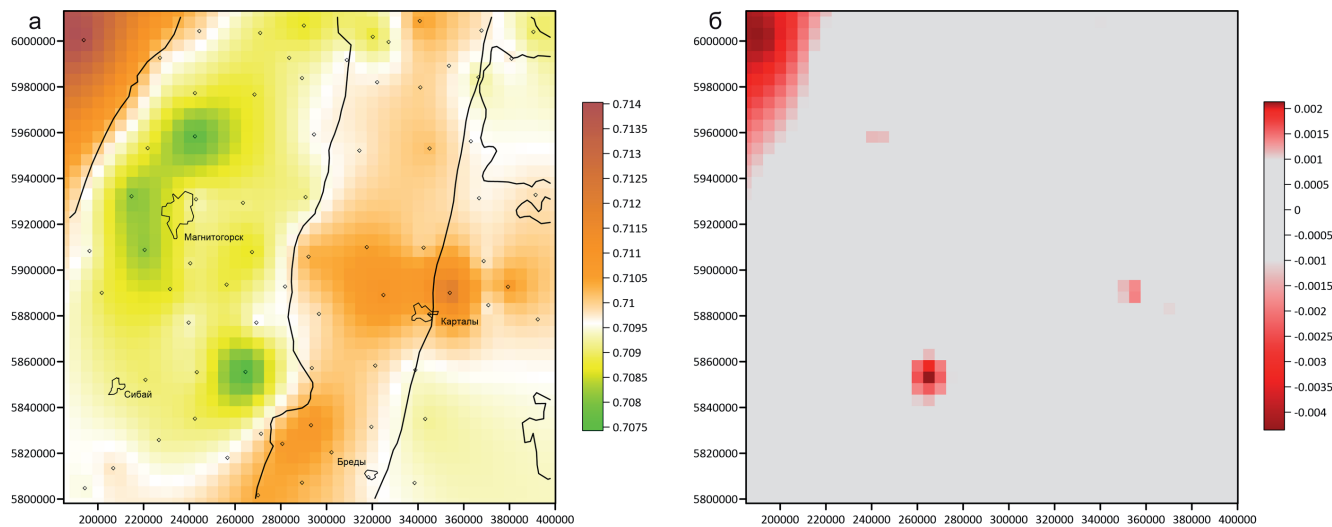


**Рис. 4.** Образцы дикорастущих трав ( $n = 95$ ).

а – интерполяция зональной изменчивости изотопов стронция методом обычного кригинга по образцам дикорастущих трав; цветовая шкала варьируется от минимального значения к максимальному значению выборки; б – ошибка интерполяции (ошибка = интерполированное значение – наблюдаемое значение).

**Fig. 4.** Grass samples ( $n = 95$ ).

а – interpolation of strontium isotope zonal variability by ordinary kriging from wild herbs samples; the color scale varies from the minimum value to the maximum sample value; б – cross validation results (error = interpolated value – observed value).



**Рис. 5.** Образцы моллюсков ( $n = 74$ ).

а – интерполяция зональной изменчивости изотопов стронция методом обычного кригинга по образцам почвенной вытяжки; цветовая шкала варьируется от минимального значения к максимальному значению выборки; б – ошибка интерполяции (ошибка = интерполированное значение – наблюдаемое значение).

**Fig. 5.** Molusks samples ( $n = 74$ ).

а – interpolation of strontium isotope zonal variability by ordinary kriging from mollusk samples; the color scale varies from the minimum value to the maximum sample value; б – cross validation results (error = interpolated value – observed value).

зоны среднее значение составляет  $0.7091 \pm 0.003$  (95%-й ДИ), среднеквадратическое отклонение – 0.0006. Граница между Тагило-Магнитогорской и

Восточно-Уральской мегазонами совпадает с границей между зонами низких и высоких значений, подчеркнутой меридиональным поясом средних по

всем выборкам (белый цвет на карте). Как и в предшествующих случаях, Восточно-Уральская мегазона характеризуется более высокими значениями, постепенно снижающимися к востоку (среднее по зоне –  $0.71 \pm 0.002$  (95%-й ДИ), среднее квадратическое – 0.0005), демонстрируя высокую гомогенность значений. В Зауральской мегазоне происходит снижение показателей, среднее составляет  $0.7099 \pm 0.006$  (95%-й ДИ), а среднее квадратическое отклонение имеет сравнительно высокое значение – 0.0009, показывая гетерогенность входящих в зону измерений.

4. Карта по образцам почв построена на основании 95 опорных точек и демонстрирует наиболее гомогенную структуру (рис. 6). Как и на предшествующих картах, высокими значениями выделяется северо-западная область ( $n = 6$ ;  $0.7104 \pm 0.002$ , 95%-й ДИ). Карта демонстрирует области низких значений в Тагило-Магнитогорской мегазоне в районе г. Магнитогорска и в юго-восточной части, повторяющие аналогичные паттерны других интерполяций. Для этой зоны среднее значение составляет  $0.7087 \pm 0.0001$  (95%-й ДИ), среднее квадратическое отклонение – 0.0006. Восточно-Уральская мегазона по-прежнему характеризуется повышенными значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , однако их область концентрируется к северу ( $0.7091 \pm 0.0002$  (95%-й ДИ), среднее квадратическое отклонение – 0.0006). Эта же область высоких значений распространяется на восток, в среднюю часть Зауральской мегазоны, где среднее измеренных образцов имеет значение  $0.7092 \pm 0.0002$  (95%-й ДИ), среднее квадратическое отклонение – 0.0005.

5. Интерполяция усредненных значений воды, растений и почвы построена лишь по тем локациям, для которых были получены все три типа образцов ( $n = 67$ ). Раковины моллюсков исключены из рассмотрения, так как это сильно сужает выборку и снижает достоверность интерполяции. Карта воспроизводит основные закономерности, выявленные на каждой из предшествующих карт по отдельности (рис. 7): зона высоких значений, совпадающая с Центрально-Уральской мегазоной ( $n = 3$ ; среднее – 0.7106); понижение значений в Тагило-Магнитогорской мегазоне ( $n = 31$ ;  $0.7091 \pm 0.002$ ; 0.005) с областями наиболее низких значений у г. Магнитогорска и в юго-восточной области; повышение значений, совпадающее с западной границей Восточно-Уральской мегазоны ( $n = 23$ ;  $0.7096 \pm 0.002$ ; 0.0004); плавное снижение показателей к востоку по направлению к Зауральской мегазоне ( $n = 31$ ;  $0.7095 \pm 0.001$ ; 0.0002).

Для каждой интерполированной карты проведена кросс-валидация. Она демонстрирует, что область наиболее низкой точности интерполяции во всех случаях лежит в северо-западном углу карты, по границе Центрально-Уральской мегазоны. Еще одна область низкой точности предсказаний лежит

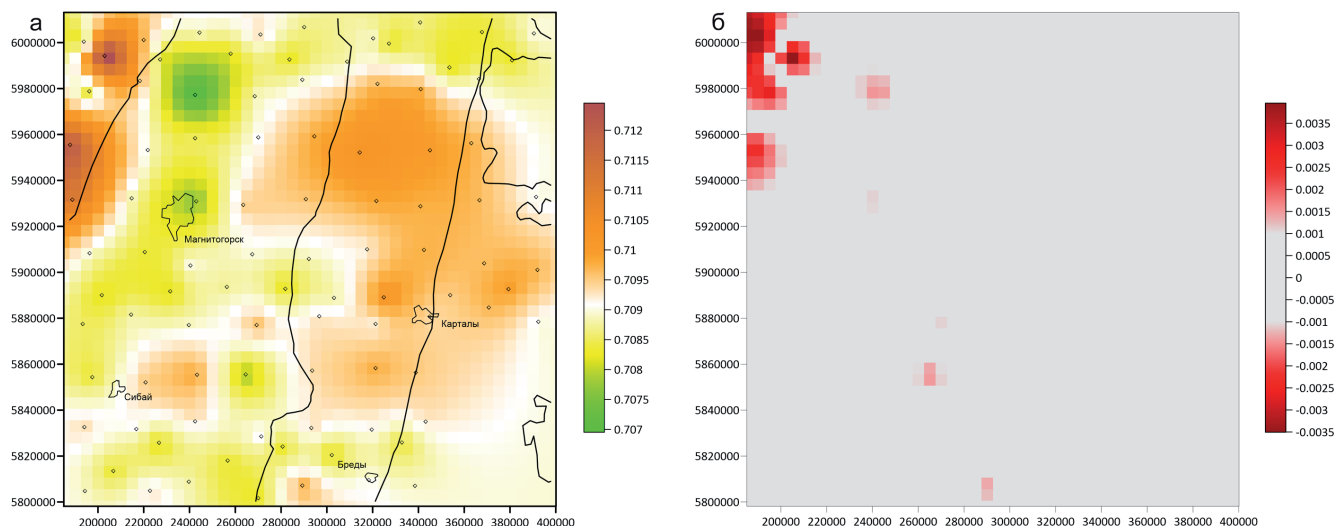
в юго-восточной части Тагило-Магнитогорской мегазоны, так как все типы образцов продемонстрировали в этой части аномально низкие значения. Во всех остальных случаях интерполяция обладает высокой точностью в соответствии с критерием 1 (интерполированные значения отличаются от измеренных не более чем на 0.001): 72%-я – для карты по воде, 90%-я – по растениям, 85%-я – по моллюскам, 93%-я – по почве и 96%-я – для карты по усредненным значениям.

Следующим этапом статистического анализа является изучение корреляции по критерию Пирсона между измеренным значением соотношений изотопов стронция (зависимая переменная) и возрастом локальных подстилающих пород (независимая переменная) в каждой из точек отбора. Анализ выявил отсутствие таковой корреляции во всех изученных парах:  $r^2 = 0.14$ ,  $p = 0.26$  в паре вода/возраст;  $r^2 = 0.11$ ,  $p = 0.35$  в паре растения/возраст;  $r^2 = -0.12$ ,  $p = 0.38$  в паре моллюски/возраст;  $r^2 = -0.13$ ,  $p = 0.28$  в паре почва/возраст. Отсутствие статистической корреляции свидетельствует об отсутствии закономерности в изменении значений изотопа в любую сторону в зависимости от возраста локальных подстилающих пород.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дробное геологическое строение Урала, выраженное разновозрастными вулканогенными, осадочными и метаморфическими толщами, осложненными внедрением ультраосновных и гранитных интрузивов, затрудняет выявление прямой зависимости между подстилающими древними породами и фоновыми значениями отношений стронция в поверхностных образцах в локальном варианте. Различия связаны с широким спектром физико-химических процессов, происходящих в верхних слоях литосферы (например, дискретным выветриванием горных пород, перемещением рыхлых отложений, почвенными преобразованиями). Это согласуется с ранее проведенными исследованиями в других регионах мира (Gerling, 2015; Holt et al., 2021). Используемая нами методика пробоотбора позволила выявить крупные фоновые дифференцированные зоны  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в поверхностных образцах. Этот вариант применим для фиксации миграций и индивидуальной мобильности на территориях со сложным геологическим строением.

Сравнение полученных интерполяционных карт соотношений изотопов стронция с геологическим строением района исследований показало приуроченность зон распределения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  к крупным структурно-формационным зонам Урала. Геохронологические Rb-Sr определения к настоящему времени сделаны не для всех осадочных и метаморфических комплексов и интрузивных массивов.

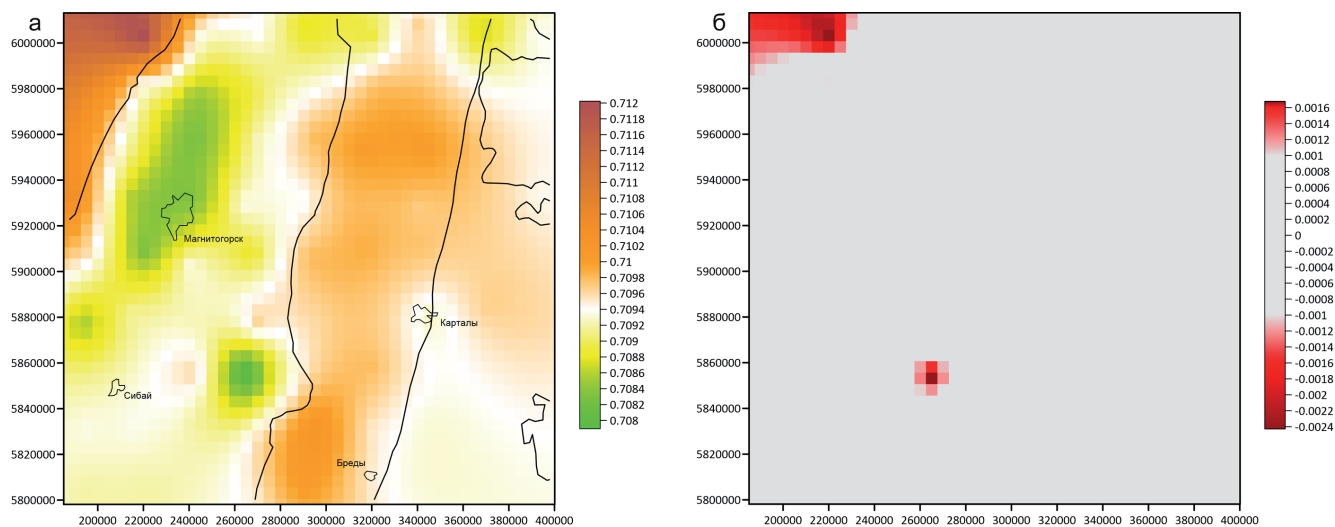


**Рис. 6.** Образцы почвенной вытяжки ( $n = 95$ ).

а – интерполяция зональной изменчивости изотопов стронция методом обычного кригинга по образцам почвенной вытяжки; цветовая шкала варьируется от минимального значения к максимальному значению выборки; б – ошибка интерполяции (ошибка = интерполированное значение – наблюдаемое значение).

**Fig. 6.** Soil samples ( $n = 95$ ).

а – interpolation of strontium isotope zonal variability by ordinary kriging from soil samples; the color scale varies from the minimum value to the maximum sample value; б – cross validation results (error = interpolated value – observed value).



**Рис. 7.** Карта усредненных значений по выборкам воды, травы и почвы 2020 г. ( $n = 67$ ).

а – интерполяция зональной изменчивости изотопов стронция методом обычного кригинга по усредненным значениям воды, травы и почвы; цветовая шкала варьируется от минимального значения к максимальному значению выборки; б – ошибка интерполяции (ошибка = интерполированное значение – наблюдаемое значение).

**Fig. 7.** Map of average values for water, grass and soil samples for 2020 samples ( $n = 67$ ).

а – interpolation of strontium isotope zonal variability by ordinary kriging using averaged values for water, grass and soil samples; the color scale varies from the minimum value to the maximum sample value; б – cross validation results (error = interpolated value – observed value).

вов Южного Урала. Поэтому для сравнения будут использованы  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  определения в горных поро-

дах, наиболее близких по геохронологии, стратиграфии и пространственному расположению.



Высокие значения отношений стронция в Центрально-Уральской мегазоне обусловлены древними подстилающими породами, представленными позднерифейскими и раннесреднедевонскими сланцами, кварцитами, мраморами, метапесчаниками. Отношение изотопов стронция в местных породах можно оценить по позднерифейским карбонатным породам катавской, инзерской, миньярской и укской свит, где оно в среднем составляет 0.7052–0.7061 (Кузнецов и др., 2003). Крупный шаг сетки пробоотбора не позволил выяснить, какие значения отношений биодоступного стронция соответствуют зоне Главного Уральского разлома, которая представлена полосой ордовикских, силурийских и девонских ультрабазитовых массивов. Вероятно, относительно небольшая мощность зоны Главного Уральского разлома (около 5 км в зоне покрытия сеткой) не оказывает заметного влияния на изотопный состав стронция в поверхностных образцах при крупной сетке. Обширное поле низких значений отношений изотопов стронция приурочено к Тагило-Магнитогорской мегазоне, подстилающие породы которой представлены девон-каменноугольными вулканитами (базальты, андезиты, вулканогенно-осадочные толщи), терригенными породами и известняками. Отношения изотопов стронция, измеренные для девонских вулканитов баймак-бурибайской, ирендыкской и карамалыташской свит, варьируются в пределах 0.7037–0.7046 (Горожанин, 1998) (по другим данным значения выше и составляют 0.70446–0.70666 (Spadea et al., 2002)). Далее на восток наблюдается широкая зона высоких значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , территориально соответствующая Восточно-Уральской мегазоне. Здесь каменноугольные и пермские гранитные интрузивы и ордовикские ультрабазитовые комплексы окружены докембрийскими, ордовикскими и силурийскими метаморфическими комплексами, девон-каменноугольными вулканогенно-осадочными толщами. Несмотря на широкое распространение относительно молодых гранитных интрузивов каменноугольного и пермского возраста, зону высоких значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в Восточно-Уральской мегазоне обуславливают докембрийские и раннепалеозойские толщи. Так, гранитоидам Джабыкско-Санарского и Степнинского комплексов соответствуют вариации значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в пределах 0.70490–0.70571 (Тевелев и др., 2018). При этом предположительно ордовикское обрамление Суундукского гранитного массива, представленное кусоканской свитой гнейсов и амфиболитов, обладает более высокими значениями – 0.7052–0.7073 (Виноградов и др., 2000). Восточнее территория сетки пробоотбора частично покрывает Зауральскую мегазону, которая имеет дробное строение и частично перекрыта осадочным чехлом Западно-Сибирской платформы, что усложняет интерпретацию результатов. Точки отбора

проб покрывают территорию, сложенную ордовикскими океаническими базальтами, нижнесилурийскими черными сланцами и верхнесилурийско-раннедевонскими рифогенными известняками, на которые наложены раннекаменноугольные рифтогенные базальтоиды (Тевелев, 2003). По данным наших измерений биодоступного стронция, Зауральская мегазона также выделяется высокими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , вероятно контролируемыми раннепалеозойскими толщами.

Среди заключений, требующих обсуждения, – отчетливые расхождения в значениях между разными типами образцов и подстилающими породами. Эта особенность зафиксирована для многих территорий, однако единообразия в сдвиге значений не прослеживается (и, видимо, не может прослеживаться). Причины расхождений сильно различаются для каждого из типов. На итоговый результат измерений биодоступного стронция влияют не только подстилающие породы, но и другие факторы. Некоторые из них достаточно очевидны, например, влияние атмосферных осадков или пылевого переноса. Однако есть и более сложные факторы (Hajj et al., 2017). Влияние атмосферных осадков сильнее ощущается в зонах высокой увлажненности. Но большая часть обследованной нами территории расположена в аридной зоне, ежегодный вклад атмосферной влаги составляет лишь 300–400 мм/год (Левит, 2005, с. 41). Лишь в северо-западном секторе нашего участка количество осадков может достигать 600 мм. Легкость растворения стронция приводит к его переносу водотоками, которые могут пересекать зоны залегания разных пород. В нашем случае мы ориентировались на стоячие водоемы и малые реки с медленным течением, но полностью избежать этого искажения вряд ли реально. Соотношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в почве обусловлены их генезисом и составом, осаждением вторичных продуктов выветривания, включенным биологическим материалом и пр. Растения с глубокими корнями способны получить изотопную метку глубинных почвенных горизонтов, отличную от поверхностно-почвенных. Способом минимизации искажения сигнала в нашем случае стал максимально возможный отказ от использования многолетних растений. Таким образом, предпринятые на этапе пробоотбора шаги способны минимизировать влияние большой суммы факторов, но не могут полностью исключить их, что подтвердили и наши работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований нами получена серия карт фоновых значений биодоступного  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для Южного Зауралья. Значительное сходство распределения дифференцированных зон  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  на картах разнотипных образцов (почва, вода, растения,

раковины моллюсков) подтверждает правильность выбранной методики отбора проб и сходимость аналитических данных. На исследуемой территории наблюдается явная тенденция приуроченности зон повышенных значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  к древним толщам, а пониженных – к более молодым, что полностью согласуется с исследованиями, проведенными ранее в других регионах. С учетом дробного геологического строения и широчайшего спектра горных пород на исследуемой территории Южного Зауралья положительным результатом является низкая дифференциация зональности, которая соответствует крупным структурно-формационным зонам Урала. Благодаря этому изложенная методика демонстрирует пригодность для исследований субширотных миграций древнего населения Южного Зауралья.

Изучение локальной мобильности требует проведения дополнительных анализов. Методика их отбора может быть аналогичной представленной в этой работе, но с меньшим шагом (размером ячейки). Альтернативный подход – отбор образцов биодоступного стронция в зонах расположения конкретных геологических структур, с нашей точки зрения, не обеспечивает статистическую достоверность итоговой карты. Таким образом, возможности дальнейших исследований связаны с 1) расширением площади созданной карты за счет умножения числа измерений в структурно-формационных зонах Урала, слабо охваченных на первом этапе; 2) контрольными измерениями образцов в местах выявленных при интерполяции аномально низких/высоких значений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ; 3) созданием локальных карт более крупного масштаба для отдельных микрорайонов в целях повышения достоверности выводов о локальной мобильности конкретных групп населения или животных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов В.И., Щербаков С.А., Горожанин В.М., Гольцман Ю.В., Буякайте М.И. (2000) Возраст метаморфитов Восточно-уральского поднятия: Sm-Nd- и Rb-Sr-изотопное датирование. *Докл. АН*, **371**(6), 784-787.
- Горожанин В.М. (1998) Первичный изотопный состав стронция в магматических комплексах Южного Урала. *Магматизм и геодинамика*. Екатеринбург: УрО РАН, 98-108.
- Козлов В.И., Макушин А.А., Шалагинов В.В. (2001) Геологическая карта Российской Федерации и сопредельной территории Республики Казахстан. М-б 1 : 1 000 000. Карта дочетвертичных образований. Лист N-40, (41). (Уфа). ООО “Башкиргеология”.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М., Мельников Н.Н., Константинова Г.В., Кутявин Э.П. (2003) Изотопный состав Sr в карбонатных породах Каратавской серии Южного Урала и стандартная кривая вариаций отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в Позднерифейском океане. *Стратигр. Геол. корреляция*, **11**(5), 3-39.
- Левит А.И. (2005) Южный Урал: география, экология, природопользование. Челябинск: ЮУКИ, 246 с.
- Пучков В.Н. (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 146 с.
- Тевелев А.В. (2003) Средне-позднепалеозойское развитие Урало-Казахстанской складчатой системы. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 406 с.
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Бурштейн Е.Ф., Тевелев А.В., Попов В.С., Кузнецов И.Е., Коротаев М.В., Георгиевский Б.В., Осипова Т.А., Правикова Н.В., Середина В.В. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 200 000. Изд-е 2-е. Сер. Южно-Уральская. Лист N-41-XXV (Карталы). Объяснит. записка. М.: Моск. фил. ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 175 с.
- Фор Г. (1989) Основы изотопной геологии. М.: Мир, 590 с.
- Bataille C.P., Crowley B.E., Wooller M.J., Bowen G.J. (2020) Advances in global bioavailable strontium isoscapes. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **555**, 109849. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109849>
- Chechushkov I., Epimakhov A., Ankushev M., Ankusheva P., Kiseleva D. (2022) Interpolated data on bioavailable strontium in the southern Trans-Urals. *Zenodo*. <https://zenodo.org/records/7370066>
- Corti C., Rampazzi L., Ravedoni C., Giussani B. (2013) On the use of trace elements in ancient necropolis studies: Overview and ICP-MS application to the case study of Valdaro site, Italy. *Microchem. J.*, **110**, 614-623.
- Gerling C. (2015) Prehistoric Mobility and Diet in the West Eurasian Steppes 3500 to 300 BC: An Isotopic Approach. Berlin, München, Boston: De Gruyter. 402 p. <https://doi.org/10.1515/9783110311211>
- Hajj F., Poszwa A., Bouchez J., Guérol F. (2017) Radiogenic and “stable” strontium isotopes in provenance studies: A review and first results on archaeological wood from shipwrecks. *J. Archaeol. Sci.*, **86**, 24-49. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.09.005>
- Holt E., Evans J.A., Madgwick R. (2021) Strontium ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) mapping: A critical review of methods and approaches. *Earth-Sci. Rev.*, **216**, 103593, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103593>
- <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/> : [website]. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.950380> : [website].
- Isaaks E.H., Srivastava R.M. (Eds). (1989) Applied Geostatistics, N. Y., Oxford University Press New York, 582 p.
- Journel A.G. (1989) Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons, American Geophysical Union Washington.
- Kasyanova A.V., Streletskaya M.V., Chervyakovskaya M.V., Kiseleva D.V. (2019) A method for  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotope ratio determination in biogenic apatite by MC-ICP-MS using the SSB technique. *AIP Conference Proceedings*, 2174, 020028. <https://doi.org/10.1063/1.5134179>
- Koryakova L., Epimakhov A.V. (2014) The Ural and Western Siberia in the Bronze and Iron Age. Cambridge: Cambridge University Press, 408 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618451>
- Kristiansen K. (2022) Archaeology and the Genetic Revolution in European Prehistory (Elements in the Archaeology of Europe). Cambridge: Cambridge University Press, 100 p. <https://doi.org/10.1017/9781009228701>
- Malainey M.E. (2011) A Consumer’s Guide to Archaeological Science: Analytical Techniques (Manuals in Archae-

- ological Method, Theory and Technique). N. Y., Springer Science+Business Media, LLC, 603 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5704-7>
- Maurer A.-F., Galer S.J.G., Knipper C., Beierlein L., Nunn E.V., Peters D., Tütken T., Alt K.W., Schöne B.R. (2012) Bioavailable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in different environmental samples – Effects of anthropogenic contamination and implications for isoscapes in past migration studies. *Sci. Total Environ.*, **433**, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.046>
- Muynck D.D., Huelga-Suarez G., Heghe L.V., Degryse P., Vanhaecke F. (2009) Systematic evaluation of a strontium-specific extraction chromatographic resin for obtaining a purified Sr fraction with quantitative recovery from complex and Ca-rich matrices. *J. Analytic. Atom. Spectrom.*, **24**, 1498–1510. <https://doi.org/10.1039/B908645E>
- Oliver M.A. (1990) Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Systems*, **4**, 313–332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Price T.D., Burton J.H., Bentley R.A. (2002) The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry*, **44**(1), 117–135. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00047>
- Slovak N.M., Paytan A. (2011) Applications of Sr Isotopes in Archaeology. (Ed. M. Baskaran). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Advances in Isotope Geochemistry*. Berlin. Heidelberg, Springer-Verlag, 743–768. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10637-8\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10637-8_35)
- Snocck C., Ryan S., Pouncett J., Pellegrini M., Claeys P., Wainwright A.N., Mattielli N., Lee-Thorp J.A., Schulting R.J. (2020) Towards a biologically available strontium isotope baseline for Ireland. *Sci. Total Environ.*, **712**, 136248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136248>
- Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Y., Brown D. (2002) Arc-continent collision in the Southern Urals: Petrogenetic aspects of the Forearc-arc complex. *Mountain Building in the Uralides*. Washington, American Geophysical Union, 101–134. <https://doi.org/10.1029/132GM07>
- Thomsen E., Andreasen R. (2019) Agricultural lime disturbs natural strontium isotope variations: Implications for provenance and migration studies. *Sci. Adv.*, **5**(3), eaav8083. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav8083>
- West J.B., Sobek A., Ehleringer J.R. (2008) A simplified GIS approach to modeling global leaf water isoscapes. *PLoS One*, **3**(6), e2447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002447>
- Valdaro site, Italy. *Microchem. J.*, **110**, 614–623.
- Faure G. (1989) Fundamentals of isotope geology. Moscow, Mir Publ., 590 p. (In Russ.)
- Gerling C. (2015) Prehistoric Mobility and Diet in the West Eurasian Steppes 3500 to 300 BC: An Isotopic Approach. Berlin, München, Boston, De Gruyter, 402 p. <https://doi.org/10.1515/9783110311211>
- Gorozhanin V.M. (1998) Primary isotopic composition of strontium in igneous complexes of the Southern Urals. *Magmatism and geodynamics*. Ekaterinburg, UB RAS, 98–108. (In Russ.)
- Hajj F., Poszwa A., Bouchez J., Guérol F. Radiogenic and “stable” strontium isotopes in provenance studies: A review and first results on archaeological wood from shipwrecks. *J. Archaeol. Sci.*, **86**, 24–49. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.09.005>
- Holt E., Evans J.A., Madgwick R. (2021) Strontium ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) mapping: A critical review of methods and approaches. *Earth-Sci. Rev.*, **216**, 103593, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103593>
- <http://geomem.mpch-mainz.gwdg.de/> : [website]. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.950380> : [website].
- Isaaks E.H., Srivastava R.M. (Eds) (1989). Applied Geostatistics, N. Y., Oxford University Press New York, 582 p.
- Journel A.G. (1989) Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons, American Geophysical Union Washington.
- Kasyanova A.V., Streletskaya M.V., Chervyakovskaya M.V., Kiseleva D.V. (2019) A method for  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotope ratio determination in biogenic apatite by MC-ICP-MS using the SSB technique. *AIP Conference Proceedings*, 2174, 020028. <https://doi.org/10.1063/1.5134179>
- Koryakova L., Epimakhov A.V. (2014) The Ural and Western Siberia in the Bronze and Iron Age. Cambridge, Cambridge University Press, 408 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618451>
- Kozlov V.I., Makushin A.A., Shalaginov V.V. (2001) Geological map of the Russian Federation and adjacent territory of the Republic of Kazakhstan. Scale 1 : 1,000,000. Map of pre-Quaternary formations. Sheet N-40, (41). (Ufa). LLC “Bashkirgeologia”. (In Russ.)
- Kristiansen K. (2022) Archaeology and the Genetic Revolution in European Prehistory (Elements in the Archaeology of Europe). Cambridge, Cambridge University Press, 100 p. <https://doi.org/10.1017/9781009228701>
- Kuznetsov A.B., Semikhatov M.A., Gorokhov I.M., Mel'nikov N.N., Konstantinova G.V., Kutayvin E.P. (2003) Sr isotopic composition in carbonate rocks of the Karatavskaya Group of the Southern Urals and the standard curve of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio variations in the Late Riphean Ocean. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **11**(5), 3–39. (In Russ.)
- Levit A.I. (2005) Southern Urals: geography, ecology, nature management. Chelyabinsk, YuUKI Publ., 246 p. (In Russ.)
- Malainey M.E. (2011) A Consumer's Guide to Archaeological Science: Analytical Techniques (Manuals in Archaeological Method, Theory and Technique). N. Y., Springer Science+Business Media, LLC, 603 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5704-7>
- Maurer A.-F., Galer S.J.G., Knipper C., Beierlein L., Nunn E.V., Peters D., Tütken T., Alt K.W., Schöne B.R. (2012) Bioavailable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in different environmental samples – Effects of anthropogenic contamination and implications for isoscapes in past migration studies. *Sci. Total Environ.*, **433**, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.046>

## REFERENCES

- Bataille C.P., Crowley B.E., Wooller M.J., Bowen G.J. (2020) Advances in global bioavailable strontium isoscapes. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **555**, 109849. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109849>
- Chechushkov I., Epimakhov A., Ankushev M., Ankusheva P., Kiseleva D. (2022) Interpolated data on bioavailable strontium in the southern Trans-Urals. *Zenodo*. <https://zenodo.org/records/7370066>
- Corti C., Rampazzi L., Ravedoni C., Giussani B. (2013) On the use of trace elements in ancient necropolis studies: Overview and ICP-MS application to the case study of



- Muynck D.D., Huelga-Suarez G., Heghe L.V., Degryse P., Vanhaecke F. (2009) Systematic evaluation of a strontium-specific extraction chromatographic resin for obtaining a purified Sr fraction with quantitative recovery from complex and Ca-rich matrices. *J. Analytic. Atom. Spectrom.*, **24**, 1498-1510. <https://doi.org/10.1039/B908645E>
- Oliver M.A. (1990) Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Systems*, **4**, 313-332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Price T.D., Burton J.H., Bentley R.A. (2002) The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry*, **44**(1), 117-135. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00047>
- Puchkov V.N. (2000) Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Ufa, Dauria Publ., 146 p. (In Russ.)
- Slovak N.M., Paytan A. (2011) Applications of Sr Isotopes in Archaeology. (Ed. M. Baskaran). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Advances in Isotope Geochemistry*. Berlin. Heidelberg, Springer-Verlag, 743-768. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10637-8\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10637-8_35)
- Snoeck C., Ryan S., Pouncett J., Pellegrini M., Claeys P., Wainwright A.N., Mattielli N., Lee-Thorp J.A., Schulting R.J. (2020) Towards a biologically available strontium isotope baseline for Ireland. *Sci. Total Environ.*, **712**, 136248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136248>
- Spadea P., D'Antonio M., Kosarev A., Gorozhanina Y., Brown D. (2002) Arc-continent collision in the Southern Urals: Petrogenetic aspects of the Forearc-arc complex. *Mountain Building in the Uralides*. Washington, American Geophysical Union, 101-134. <https://doi.org/10.1029/132GM07>
- Tevelev A.V. (2003) Middle-Late Paleozoic development of the Ural-Kazakhstan folded system. Doct. geol. and min. sci. diss. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 406 p. (In Russ.)
- Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Burshtein E.F., Tevelev A.V., Popov V.S., Kuznetsov I.E., Korotaev M.V., Georgievskii B.V., Osipova T.A., Pravikova N.V., Sereda V.V. (2018) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000. Second edition. Series South Ural. Sheet N-41-XXV (Kartaly). Explanatory note. Moscow, Moscow branch of FSBI "VSEGEI", 175 p. (In Russ.)
- Thomsen E., Andreasen R. (2019) Agricultural lime disturbs natural strontium isotope variations: Implications for provenance and migration studies. *Sci. Adv.*, **5**(3), eaav8083. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav8083>
- Vinogradov V.I., Shcherbakov S.A., Gorozhanin V.M., Gol'tsman Yu.V., Buyakaite M.I. (2000) Age of metamorphites of the East Ural uplift: Sm-Nd- and Rb-Sr-isotope dating. *Dokl. Akad. Nauk*, **371**(6), 784-787. (In Russ.)
- West J.B., Sobek A., Ehleringer J.R. (2008) A simplified GIS approach to modeling global leaf water isoscapes. *PLoS One*, **3**(6), e2447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002447>