

*А.В. Епимахов<sup>1</sup>, М.Н. Анкушев<sup>1,2</sup>, П.С. Анкушева<sup>1,2</sup>, Д.В. Киселева<sup>1,3</sup>, И.В. Чечушков<sup>4</sup>  
A.V. Epimakhov, M.N. Ankushev, P.S. Ankusheva, D.V. Kiseleva, I.V. Chechushkov*

*<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, epimakhovav@susu.ru*

*<sup>2</sup>Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс*

*<sup>3</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург*

*<sup>4</sup>Институт истории и археологии УрО РАН, г. Екатеринбург*

## **Предварительные результаты анализа изотопов стронция в рамках изучения мобильности населения бронзового века Зауралья**

### **Preliminary results of the strontium isotopes analysis in the framework of the study of the mobility of the Bronze Age population in the Trans-Urals**

В работе представлены итоги первого этапа реализации проекта по изучению мобильности древнего населения Южного Зауралья методами анализа радиогенных изотопов стронция  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Разнотипные образцы отобраны в 70 локациях по сетке, покрывающей площадь 33 000 км<sup>2</sup>. Проанализированы 67 образцов воды и 57 образцов дикорастущих трав. Выборки статистически достоверны и демонстрируют значительное сходство. Для первой методом обычного кригинга построена карта значений, подтвердившая наличие различий в составе изотопов разных геологических структур.

The paper presents preliminary results of studying of ancient mobility in the southern Urals by applying the strontium analysis. 70 points were sampled covering the total area of 33.000 sq.km. We measured the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio in 67 samples of water and 57 samples of grass from the same locations. The statistical analysis of two batches demonstrates their close similarity. The map of values was interpolated with simple krigging based on the 67 samples of water. The map demonstrated the variability in values depending on the geological structure of the region.

Обращение к тематике мобильности в археологии, как это нередко бывает в истории науки, стимулировано извне. Сказались два фактора. Первый – общий интерес к этому феномену в рамках самых разных дисциплин (география, экономика, урбанистика и т.д.) и попытка разработать общую теорию мобильности. Часть авторов предполагает даже, что речь идет о новой методологической парадигме [Sheller, Urry, 2006]. Второй фактор – разработка и поэтапное внедрение методов диагностирования мобильности для древних периодов. При этом тематика (особенно миграционная) и ранее была в сфере живого интереса многих специалистов, вынужденных опираться на типологические заключения. Ныне спектр возможных методов диагностирования мобильности существенно пополнен методами палеогенетики и геохимии [Vandkilde et al., 2015 и др.]. Одни методы на современном этапе связаны с реконструкцией масштабных дальне-дистанционных перемещений человеческих коллективов, вторые – при определенных условиях позволяют обратиться к меньшим по масштабу, но столь же важным процессам – индивидуальная, сезонная, хозяйственная и другие виды мобильности. Вне решения этих вопросов трудно надеяться на появление надежных вариантов реконструкции экономических и социальных структур, особенно с учетом того, что подавляющее число их реконструкций опирается на изучение поселений (практически всегда частичное), иногда в сочетании с синхронными погребальными памятниками. Добавим к этому, что зачастую даже принципиально важный вопрос о длительности функционирования объекта решается умозрительно.

Все перечисленное имеет непосредственное отношение к зауральскому бронзовому веку (III–II тыс. до н.э. в системе калиброванных радиоуглеродных дат) [Епимахов, 2021]. Территория относительно хорошо изучена в степной и лесостепной зонах, где обнаружены многочисленные памятники (поселения, могильники, горные выработки, культовые

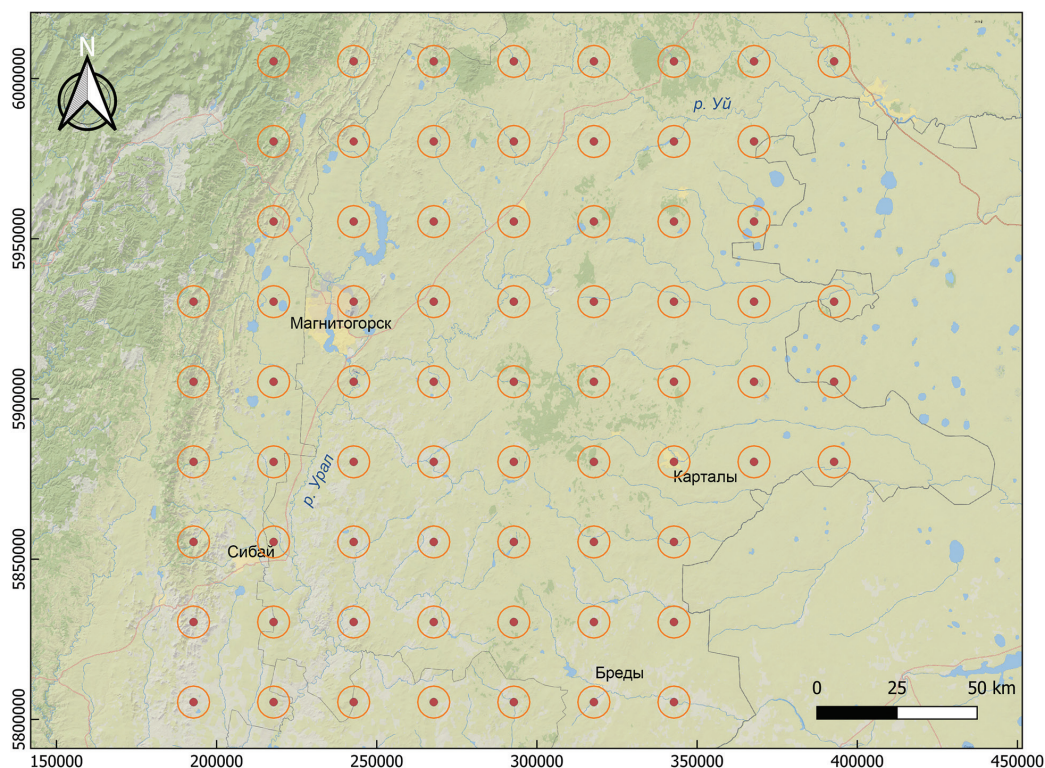


Рис. 1. Карта района исследования и зоны отбора образцов.

объекты). К настоящему времени выделен ряд археологических культур, для большей части их них установлены хронологические рамки и относительная хронология. Начиная с рубежа III–II тыс. до н.э., несмотря на различия культурных традиций, хорошо диагностируется экономическая система жизнеобеспечения, базирующаяся на комплексном животноводстве, в сочетании с другими отраслями, включая металлопроизводство.

Геологическое строение территории, включающее структуры разного возраста, является одним из основных условий успешности применения методов анализа радиогенных изотопов  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , положенного в основу настоящего исследования. Препятствием для диагностирования мобильности людей и животных в древности является отсутствие базы данных естественных значений вариаций изотопов Sr. В результате работы в данной тематике, с одной стороны, продемонстрирована успешность применения [Киселева и др., 2019; Анкушева и др., 2021 и др.], с другой, в каждом случае пришлось ориентировать на конкретный локус, где специально отбирались природные образцы. Такой подход довольно типичен для многих работ и за пределами Урала, но представляется решительно недостаточным для формирования более масштабной картины. Своей целью на данном этапе мы видим построение базовой карты изотопов стронция Южного Урала, соотнесенной с основными геологическими структурами региона. Это предполагает выработку методики отбора и анализа разнотипных образцов (горные породы, вода, раковины моллюсков, почва, растения одного вида) на примере одного участка.

Зона отбора образцов лежит севернее р. Уй, далее по границе Челябинской области с Республикой Казахстан на востоке и заходя в Республику Башкортостан на западе и Оренбургскую область – на юге (рис. 1). Все точки сопоставлены с буферными зонами с

радиусами 10 км для нескольких опорных поселений бронзового века (Каменный Амбар, Аркаим, Синташта, Левобережное (Синташта II), Сарым-Саклы, Степное, Черноречье). Во всех случаях буферные зоны с радиусом 5 км вокруг точек отбора лежат достаточно близко (1–2 км) или пересекаются с буферными зонами с радиусом 5 км вокруг поселений. Выбор такого значения радиуса для поселений обусловлен моделью экономической зоны древних поселений, показывающей, что для содержания домашнего стада жителям синташтинско-петровских поселков требовалась область с радиусом не менее 4 км [Stobbe et al., 2016]. Результирующая карта полностью покрывает зону распространения синташтинско-петровских памятников Южного Зауралья.

Для отбора образцов было выбрано 70 локаций на максимально возможном удалении от промышленно активных населенных пунктов, возделываемых полей и сельхозугодий, потенциальным источником стронция с измененным изотопным составом на которых могут служить удобрения [Thomsen, Andreassen, 2019; Maurer et al., 2012]. К настоящему моменту проанализированы две серии: по образцам воды ( $n = 67$ ) и дикорастущих трав (Полынь горькая (*Artemisia absinthium*)) ( $n = 57$ ), позволяющие сделать предварительные заключения.

Методы анализа соответствуют следующим этапам работы: определение значений изотопов Sr, статистический анализ серий и анализ пространственного распределения данных (геостатистика).

Анализ изотопного состава Sr проведен в блоке чистых помещений (классы 6 и 7 ИСО, ИГТ УрО РАН, ЦКП «Геоаналитик», г. Екатеринбург). Образцы травы были просушены на воздухе, затем измельчены в электромельнице и озолялись в течении 12 ч [Maurer et al., 2012]. Образцы воды консервировались концентрированной азотной кислотой и, после фильтрования и определения содержания стронция, направлялись непосредственно на хроматографическое выделение Sr, которое проводилось на смоле SR (Triskem) по одностадийной схеме [Muynck et al., 2009; Kasyanova et al., 2019].

Измерения изотопного состава Sr проводили на магнито-секторном мультиколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (МК-ИСП-МС) Neptune Plus. Для коррекции масс-дискриминации использовали комбинацию бреккетинга и нормализации по экспоненциальному закону  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$  [Nier, 1938]. 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 каждых 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 2019–2020 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  $\pm 0.003 \%$ .

**Статистическое исследование выборки значений биодоступного стронция по образцам воды и травы.** Выборка по образцам воды состоит из 67 значений. Разбег значений составляет 0.008571. Изучение выборки методом «Диаграмма стебель и листья» показывает, что она формирует колоколовидную фигуру с одной вершиной и небольшим отклонением в большую сторону, близкую нормальному распределению. Следовательно, числовой ряд может быть подвергнут статистическому исследованию и охарактеризован в терминах средних значений для последующего сравнения с другими типами образцов. Выборка по воде характеризуется следующими статистическими значениями:  $\bar{x} = 0.709525$ ,  $\sigma = 0.001018$ ,  $\text{SE } 95 \% = 0.000492$ , т.е. с 95 % вероятностью среднее значение выборки лежит в интервале от 0.709279 до 0.709771 ( $0.709525 \pm 0.000492$ ).

Выборка значений по образцам дикорастущей травы насчитывает 57 значений. Разбег значений составляет 0.00321 при  $\min = 0.707972$ ,  $\max = 0.711182$ . Изучение выборки методом «Диаграмма стебель и листья» показывает, что выборка формирует колоколовидную фигуру с одной вершиной, близкую нормальному распределению. Выборка по траве характеризуется следующими статистическими значениями:  $\bar{x} = 0.709602$ ,  $\sigma = 0.000532$ ,  $SE\ 95\ \% = 0.709460$ , т.е. с 95 % вероятностью среднее значение выборки лежит в интервале от 0.709460 до 0.709743 ( $0.709602 \pm 0.709460$ ).

Две выборки демонстрируют схожие характеристики, а сравнение методом t-статистики показывает отсутствие статистически достоверной разницы между средними значениями ( $t = 0.513298$ ,  $p = 0.608664$ ). Это может свидетельствовать о незначительной локальной вариативности измеренных значений двух разных типов образцов. Для проверки этой гипотезы проведем сравнение разницы измеренных значений пар образцов, полученных в пределах одной буферной зоны. Так, разница варьирует в пределах от  $-0.002073$  до  $0.005164$ , при среднем значении  $0.000008$  и среднеквадратическом отклонении  $0.000898$ . Данная средняя разница является незначительной, т.к. близко отклонению в две сигмы измеренных значений ( $0.000007$ ). Визуальный анализ картированных значений также подтверждает близость локальных измерений образцов травы и воды.

**Методы геостатистики и картирование значений биодоступного Sr.** Моделирование карты биодоступного Sr осуществляется с использованием геостатистики. Принципиально методы геостатистики исходят из идеи получения пространственных данных о неизвестных точках путем интерполяции данных об известных точках. Одним из наиболее хорошо разработанных методов вычисления пространственных координат, широко применяемым в топографии, картографии, геологии, является метод кригинга, сущность которого заключается в прогнозировании значений неизвестных точек поверхности на основании набора точек с известными z-значениями (в данном случае, измеренные значения изотопов стронция) [Oliver, 1990].

Метод кригинга предполагает, что, по крайней мере, часть пространственных вариаций может быть смоделирована с использованием пространственной автокорреляции (тенденция к близким значениям у пространственно-близких объектов). В ходе интерполяции метод подбирает взвешенное среднее величин проб, которые имеют минимальную дисперсию [Армстронг, 1998, с. 88]. Приемы работы кригинга могут быть использованы для описания и моделирования пространственных структурных закономерностей, предсказания значений неизмеренных точек, измерения погрешности, связанной с прогнозируемым значением в неизмеренных местоположениях. Метод подходит для определения неизвестных значений, если существует направленное смещение в данных. В результате применения метода может быть получена модель изучаемой поверхности, представленная двумерными планами высотных полигонов или трехмерными моделями [Чечушков, 2015].

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

Результирующая карта распределения биодоступного Sr по образцам воды демонстрирует пространственную закономерность: значения возрастают с запада на восток с наиболее высокими значениями в зоне зауральского пенеппена. Выявленные аномалии отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  совпадают с четырьмя крупными структурно-формационными зонами Урала, отличающимися друг от друга генезисом, возрастом и составом слагающих горных пород.



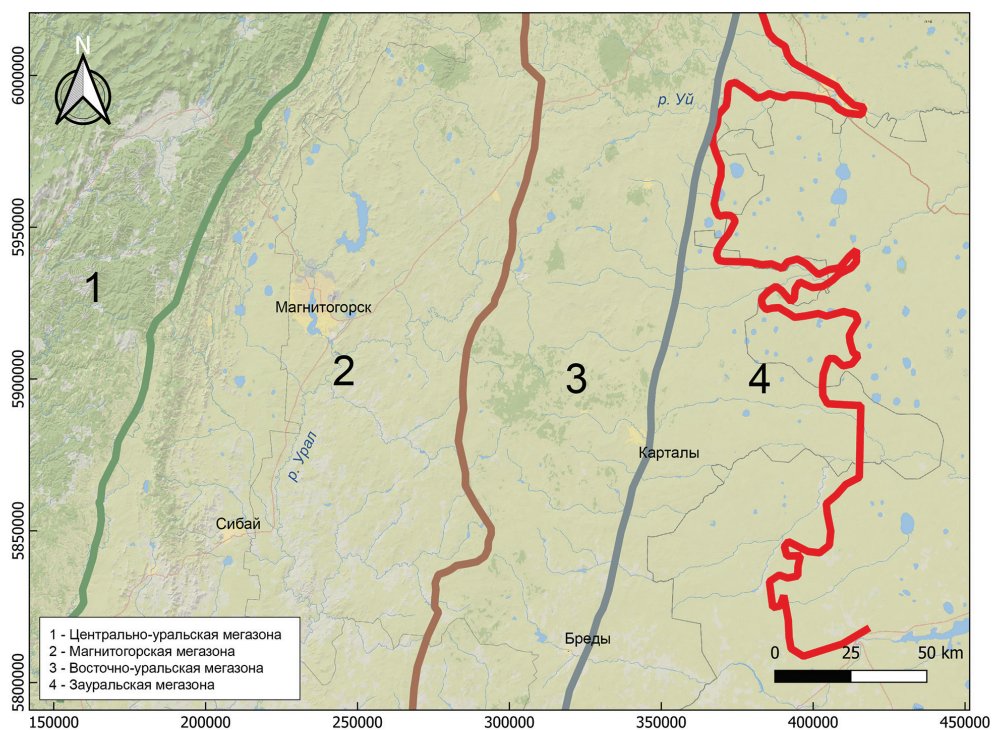


Рис. 2. Карта геологических структурно-формационных зон района исследования.

На западе сетка отбора образцов касается Центрально-Уральской мегазоны, сложенной в различной степени метаморфизованными отложениями верхнего докембрия – нижнего палеозоя (рис. 2). Спектр горных пород включает катагенетически измененные осадочные толщи и высокометаморфизованные кристаллические комплексы [Пучков, 2000]. Территория мегазоны была опробована только двумя пограничными точками (рис. 3), поэтому для выводов потребуется расширить сетку в западном направлении. Восточнее находится Магнитогорская мегазона, образованная палеозойскими островодужными вулканогенно-осадочными формациями [Пучков, 2000]. Зона характеризуется низкими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Пограничная точка с высоким значением  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в северо-западном углу сетки нуждается в дополнительном уточнении (см. рис. 3). 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 ультрабазитовые комплексы, гранитные интрузивы, вулканогенно-осадочные толщи, метаморфические комплексы [Пучков, 2000]. Зона характеризуется наиболее высокими значениями  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Восточная граница сетки отбора проб лежит в пределах Зауральской мегазоны, сложенной каменноугольными палеостроводужными известково-щелочными образованиями [Пучков, 2000]. Эта зона опробована небольшим количеством точек и нуждается в дальнейшем расширении выборки. Пока Зауральская мегазона демонстрирует средние значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Учитывая дробное геологическое строение и широчайший спектр горных пород на исследуемой территории, положительным результатом является низкая дифференциация выявленных аномалий. Благодаря этому изложенная методика демонстрирует пригодность для исследований субширотных миграций древнего населения Южного Зауралья.

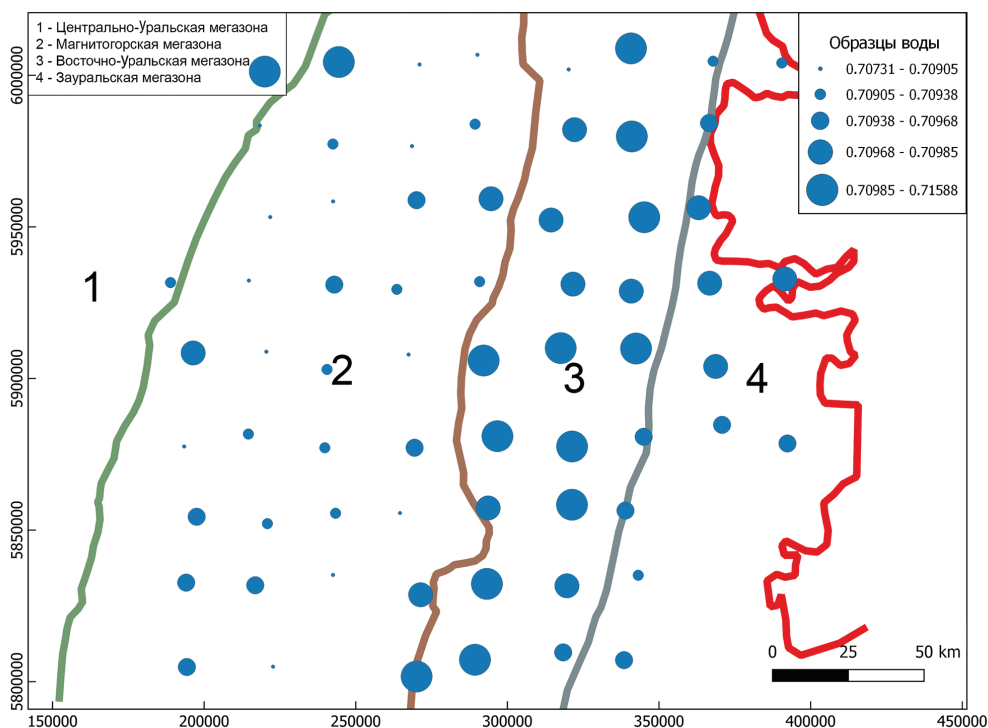


Рис. 3. Карта распределения значений изотопов  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  по образцам воды, соотнесенные с геологическими структурно-формационными зонами района исследования.

Установлено, что распределение значений изотопов Sr, полученных по итогам анализа воды и дикорастущих растений, подчиняются одним и тем же закономерностям. Статистические различия между ними незначительны. Это подтверждает правильность избранной методики, которая будет дополнительно верифицирована в ходе анализа других источников биодоступного стронция (раковины моллюсков, почва).

Для площади 33 000 км<sup>2</sup> была построена карта интерполированных значений изотопов Sr на основе анализа образцов воды (рис. 4). Согласно этой карте, прослеживается общая тенденция возрастания значений с запада на восток. Субмеридионально располагается зона высоких значений, видимо, приуроченных к Восточно-Уральской мегазоне, зона низких значений тяготеет к Магнитогорской мегазоне. Для уточнения изотопных значений других зон тектонического районирования, которые попали в зону пробоотбора только незначительным числом точек (Центрально-Уральская, Зауральская мегазоны и Западно-Сибирская плита), требуется существенное расширение числа измерений и площади обследования. Кроме того, карта обнажила необходимость дополнения числа анализов в границах обследованного участка в тех случаях, когда интерполяция опирается на единичные анализы либо близ границы геологических структур.

Несмотря на промежуточный характер итогов работы, можно констатировать, что полученные данные соответствуют ожиданиям и на следующем этапе могут быть использованы для диагностирования местного или неместного происхождения биологических организмов, происходящих из археологических коллекций бронзового века, а также других периодов, тем самым определив степень мобильности людей и животных. Изучение кон-

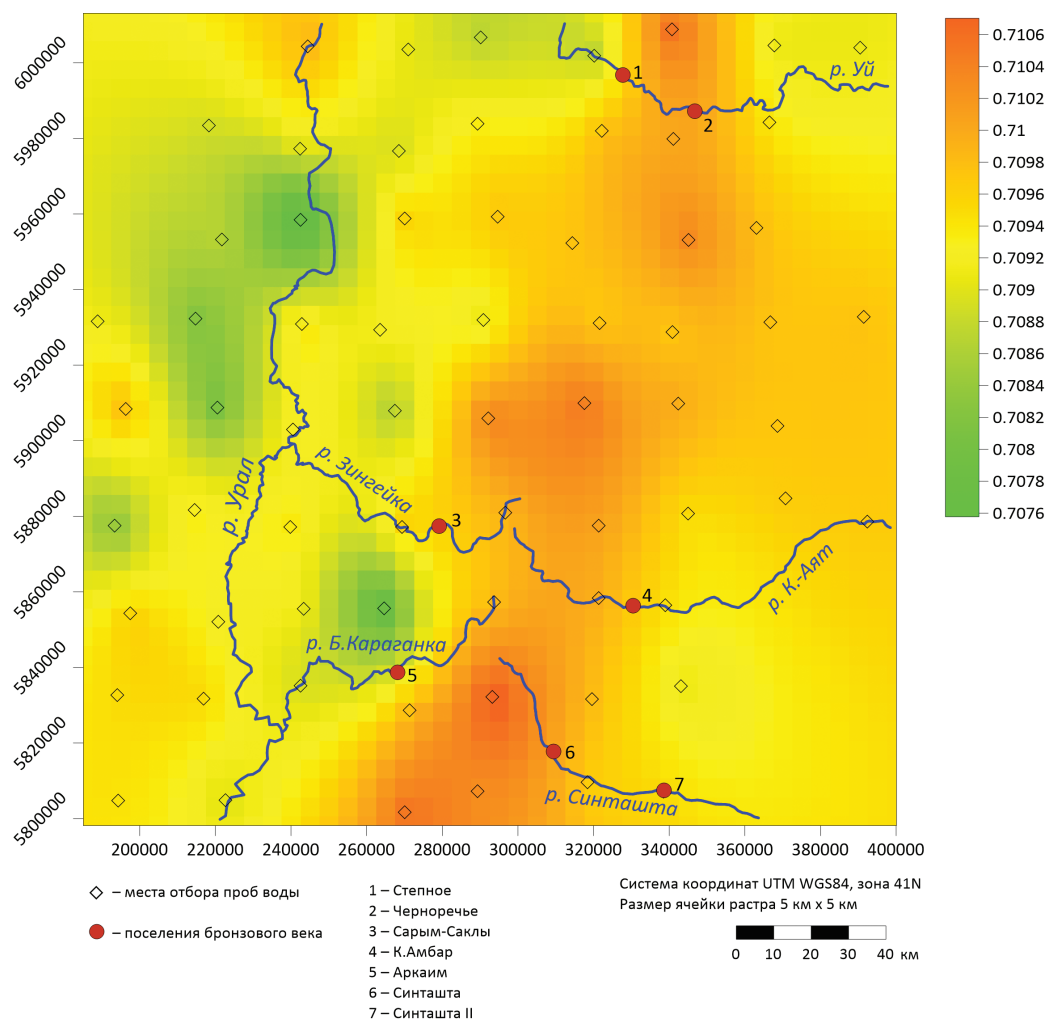


Рис. 4. Карта интерполированных значений изотопов Sr на основе анализа образцов воды с применением обычного кригинга.

кретных археологических комплексов, видимо, потребует также увеличения числа измерений для создания более подробной карты вариаций изотопов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект №20-18-00402 «Миграции человеческих коллективов и индивидуальная мобильность в рамках мультидисциплинарного анализа археологической информации (бронзовый век Южного Урала)».*

## Литература

Анкушева П.С., Киселева Д.В., Бачура О.П., Алаева И.П., Анкушев М.Н., Окунева Т.Г. Труд и питание горняков бронзового века Южного Зауралья (по данным изотопного состава стронция в остеологических остатках рудника Новотемирский) // Stratum plus. Археология и культурная антропология. 2021. № 2. С. 69–83.

Армстронг М. Основы линейной геостатистики. М.: Фонтанебло, 1998. 148 с.

Епимахов А.В. Мультидисциплинарные археологические исследования в изучении миграций и мобильности (бронзовый век Южного Урала) // Проблемы истории, филологии, культуры. 2021. В печати.

Киселева Д.В., Червяковская М.В., Шишлина Н.И. Изотопный анализ стронция в современном сырье и ископаемом текстиле // Геоархеология и археологическая минералогия. 2019. С. 25–28.

Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.

Чечушков И.В. Методы геостатистики в изучении поселенческих памятников бронзового века // Этнические взаимодействия на Южном Урале: мат. VI Всерос. науч. конф. Челябинск, 2015. С. 90–96.

Kasyanova A.V., Streletskaia M.V., Chervyakovskaya M.V., Kiseleva D.V. 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, 2019. Vol. 2174 (1). 020028.

Maurer A.-F., Galer S.J.G., Knipper C., Beierlein L., Nunn E.V., Peters D., Tütken T., Alt K.W., Schöne B.R. Bioavailable  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in different environmental samples – Effects of anthropogenic contamination and implications for isoscapes in past migration studies // Science of the total environment. 2012. Vol. 433. P. 216–229.

Muynck D. D., Huelga-Suarez G., Heghe L. V., Degryse P., Vanhaecke F. Systematic evaluation of a strontium-specific extraction chromatographic resin for obtaining a purified Sr fraction with quantitative recovery from complex and Ca-rich matrices // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2009. Vol. 24. P. 1498–1510.

Nier A.O. The isotopic constitution of strontium, barium, bismuth, thallium and mercury // Physical Review. 1938. Vol. 54. P. 275–278.

Oliver M.A. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems // International Journal of Geographic Information Systems. 1990. № 4. P. 313–332.

Sheller M., Urry J. The new mobilities paradigm // Environment and Planning A: Economy and Space. 2006. Vol. 38 (2). P. 207–226.

Stobbe A., Gumnior M., Rühl L., Schneider H. Bronze Age human–landscape interactions in the southern Trans-Ural steppe, Russia—Evidence from high-resolution palaeobotanical studies // The Holocene. 2016. № 26 (10). P. 1692–1710.

Thomsen E., Andreassen R. Agricultural lime disturbs natural strontium isotope variations: Implications for provenance and migration studies // Science Advances. 2019. Vol. 5. Is. 3. eaav8083.

Vandkilde, H., Hansen, S., Kotsakis, K., Kristiansen, K., Müller, J., Sofaer, J., Sørensen, M.L.S. Cultural mobility in Bronze Age Europe. Introduction // Suchowska-Ducke, Paulina, Scott Reiter, Samantha and Vandkilde, Helle (eds.) Mobility of Culture in Bronze Age Europe. (British Archaeological Reports, S2771) Oxford, GB. Archaeopress, 2015. P. 5–37.

**П.В. Афанасьев**

**P.V. Afanasyev**

Иркутский государственный университет, г. Иркутск,  
afanasjew.pavel2016@yandex.ru

## **Морфология эолово-коррадированных «следов»**

### **Morphology of aeolian-corraded «traces»**

В работе представлены результаты изучения проблем археологического материала, подвергнувшегося воздействию эоловой корразии, предприняты попытки суммировать основные термины и их содержание, а также систематизировать основные понятия и разновидности эоловой корразии.

The paper presents the results of the study of the problems of archaeological material subjected to the influence of aeolian corrosion; to summarize the main terms and their contents and systematize the basic concepts and varieties of aeolian corrosion.