

УДК 631.5:004.9(477.75)

© Ж.А. Буряк, Ф.Н. Лисецкий, О.А. Маринина

Ж.А. Буряк, Ф.Н. Лисецкий, О.А. Маринина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ГЕОСТАТИСТИКИ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ АГРОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗОН ДРЕВНЕЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ РАЙОНОВ



Введение

Геоархеологические исследования на стыке географии, почвоведения и археологии, усиленные использованием компьютерных технологий, геоинформационного моделирования и данных дистанционного зондирования, позволяют получать качественно новые результаты, что при решении ряда методических проблем создает перспективы их широкого применения. Одним из направлений в этой области является реконструкция территорий организации древних систем земледелия, латентно проявляемых в современных агроландшафтах, но априорно предполагаемых на территориях вблизи ядер расселения. Геоинформационное моделирование древних пахотных угодий опирается на синтез археологических, почвенных и ландшафтных исследований [1-3]. Специфика древних систем земледелия и продолжительность распашки неизбежно находят отражение в современной структурно-функциональной организации почв. Почвенно-генетические признаки или их комбинации могут быть обоснованы в качестве индикаторов, позволяющих объективно выявить территории с неоднократными и различными по длительности этапами земледелия, что позволяет провести пространственные реконструкции древних систем землепользования.

Среди античных полисов Северного Причерноморья большой исследовательский интерес вызывает сельскохозяйственная округа Керкинитиды (вблизи современной Евпатории). Установление ее пространственной локализации и максимальных размеров при длительном функционировании (с начала последней трети VI в. до н.э. и до II в. до н.э.) требует поиска нетривиальных решений. Объективных свидетельств землепользования в виде следов размежевания земель, как, например, в Херсонесе, Ольвии, здесь не наблюдается. Поэтому представления археологов о локализации аграрной округа Керкинитиды и ее размерах остаются дискуссионными. [4, с. 51; 5, с. 22-24; 6, с. 25-26]. Поэтому авторы сделали попытку разработать методику разграничения

разновременных пашен, базирующуюся на анализе пространственного распределения почвенных свойств, диагностирующих агрогенез. Цель исследований заключалась в объективном обосновании границы древнего земледелия, опираясь на геохимические анализы почв и результаты пространственного моделирования и геоэстатистики.

Для изучения пространственных закономерностей почвенного покрова, их моделирования и прогнозирования в последние десятилетия стали успешно применять методы геоэстатистического анализа [7-11]. Такой подход позволяет учесть случайную составляющую распределения почвенных свойств на основе пространственной зависимости между точками опробования. Отмечается [12], что почвенные исследования с использованием геоэстатистического подхода становятся более комплексными, если дополнены методами дистанционного зондирования Земли, множественного статистического анализа и статистического моделирования. Новые геоэстатистические интерпретации позволяют дать более точную оценку распределения и дополнить традиционные модели [13, 14]. Имеются успешные примеры установления границы зон изменения почвенных признаков с использованием геоэстатистики: в работе [15] с учетом направления изменчивости pH были выявлены области наибольшего изменения свойства; в исследовании [16] удалось выявить несколько однородных по свойствам ареалов поля с использованием кластеризации переменных кригинга.

Объекты и методы

Согласно мнению В.А. Кутайсова [5, с. 150], агрохозяйственная зона полиса имела ширину не более чем 2,5-3 км. Для сравнительного анализа полигон исследования – агроландшафты к северо-западу от Евпатории – был выбран таким образом, чтобы охватить как предполагаемую зону древнего земледелия, так и более удаленные территории с теми же почвенными разностями, но входящие в ареал текущего (150-160 лет) земледельческого освоения.

Таким образом, при организации полевых исследований изначально предполагали существование качественной неоднородности почвенных свойств, прежде всего тех, которые сохранили реликтовые признаки предыстории земледелия.

Опробование проводили на полигоне площадью 5,4 тыс. га (рис. 1). Предполагали, что юго-восточная часть полигона, наиболее приближенная к городским стенам полиса, входила в его сельскую округу. Рельеф полигона равнинный (крутизна склонов не превышает 1°). Почвенный покров в равных долях представлен черноземами южными мицелярно-карбонатными среднесуглинистыми на лессовидных суглинках и черноземами карбонатными щебнистыми среднесуглинистыми на элювии карбонатных пород.

Для обеспечения репрезентативности опробования выборка точек по территории должна иметь рандомизированный характер. Для опорной сетки опробования выбран шаг 560 метров. Но на камеральном этапе были определены лакуны. Связано это с тем, что по разновременным топографическим картам и архивным космическим снимкам определены

многолетние насаждения (сады и виноградники), где могли применять плантажную обработку почвы, а также территории некрополей и антропогенно нарушенные земли (ямы, скопления камней). Такие контуры были исключены из обследования. В итоге были определены 128 точек отбора почвенных образцов для пашни, используемой для полеводства. В полевых условиях встречались кратковременные (1-5 лет) залежи, вошедшие в выборку. А старые залежи ($n=6$) были исключены из анализа. Для проверки равномерности пространственного распределения оставшихся 122 точек использовали метод анализа ближайшего соседства (*Nearest Neighbor*), что позволило оценить среднее расстояние от каждого объекта до ближайшего к нему «соседа». Анализ подтвердил с 99%-ной вероятностью, что распределение точек дисперсное и они подходят для дальнейших пространственных аналитических операций.

Для каждой точки рассчитано содержание органического углерода C_{org} (по уравнению его связи с окраской почвы – кодами шкалы Манселла [17]). Методом рентгенофлуоресцентного анализа («Спектроскан Макс-GV») было определено

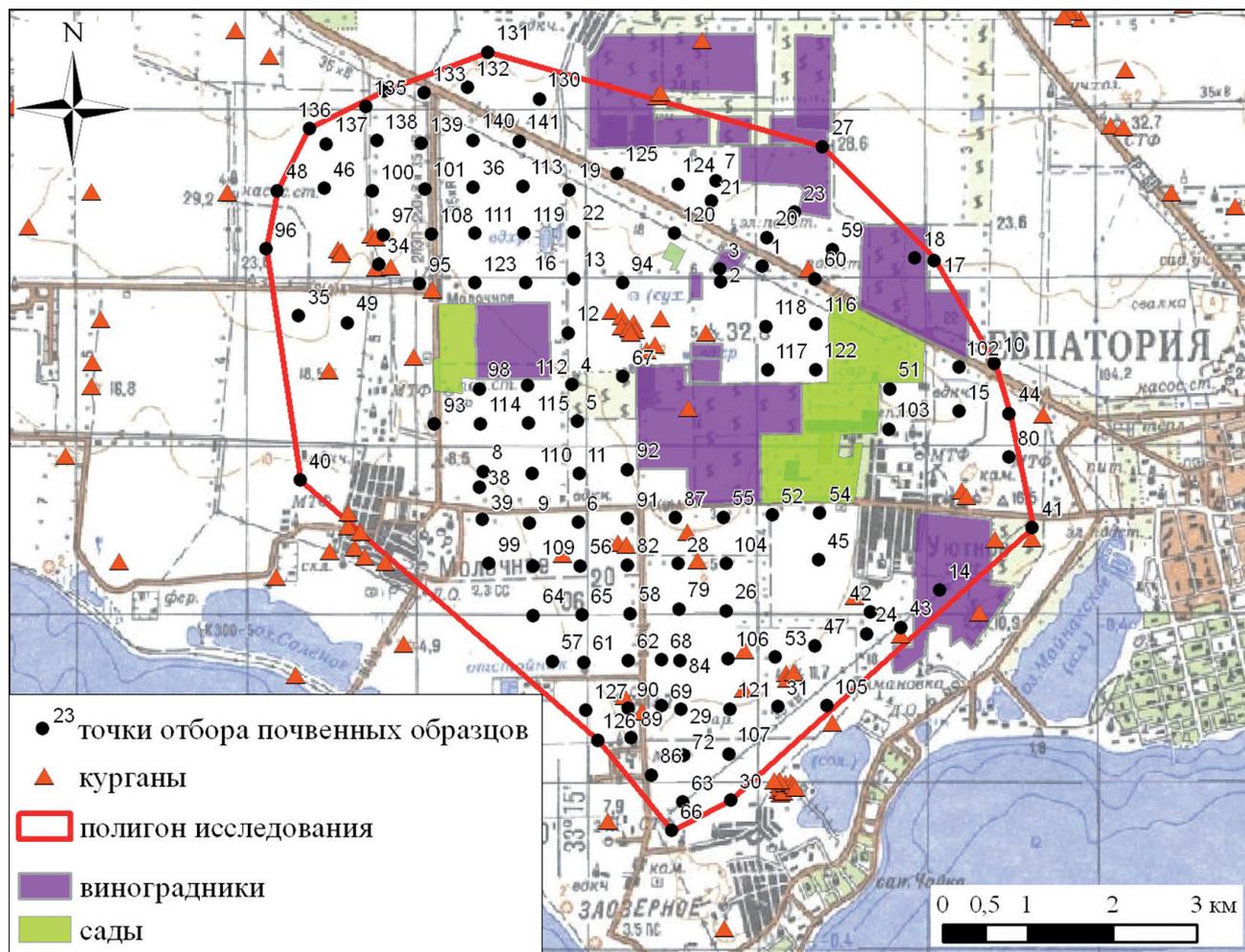


Рис. 1. Исследовательский полигон к северо-западу от Керкинитиды

содержание макро- и микроэлементов, что позволило рассчитать 52 геохимических соотношения и коэффициента. По результатам исследования старопахотных почв [18] установлено, что они сохраняют в своей памяти (через комплекс диагностических показателей) свидетельства предшествующих этапов длительного земледелия. Путем формального (через коэффициент вариации) и содержательного отбора были определены семь показателей, которые могут выступать индикаторами длительности земледельческой нагрузки почвы: $S_1 - \text{Rb/Sr}$; $S_2 - \text{Ba/Sr}$; $S_3 - \sum(\text{Ni, Cu, Cr, Ba, V, Pb, Co})$; $S_4 - (\text{Ca} + \text{Sr} + \text{Mg} + \text{Na})/\text{Ti}$; $S_5 - (\text{Fe} + \text{Al})/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{Mg})$; $S_6 - (\text{Ca} + \text{Mg} + 10 \cdot \text{P})/\text{Ti}$; $S_7 - C_{\text{org}}$.

Для комплексного отражения агрогенных изменений был рассчитан обобщенный интегральный показатель S_{Σ} как сумма семи нормированных значений. Для нормирования показателей, значения которых в результате земледелия уменьшаются ($S_{1-3,5,7}$), использовали формулу (1); для показателей, которые со временем увеличиваются ($S_{4,6}$) – формулу (2):

$$x_{n(i)} = \frac{x_i}{x_{\max(i)}}, \quad (1)$$

$$x_{n(i)} = \frac{x_{\min(i)}}{x_i}, \quad (2)$$

где $x_{n(i)}$ – нормированные значения показателей; x_i – абсолютные значения показателей; $x_{\min(i)}$, $x_{\max(i)}$ – минимальные и максимальные значения i -го показателя.

Для установления границы разновременных пашен использовали программный продукт *ArcGIS 10.1* – модули пространственной статистики (*Spatial Statistics*) и геостатистики (*Geostatistical Analyst*). Для анализа пространственного распределения почвенных свойств применяли кластерный анализ, геостатистические и детерминистические методы: радиально-базисной функции (*RBF*) и вероятностного кригинга (*probability kriging*). Как отмечено по результатам проведения почвенных исследований [11], различия между параметрами аппроксимации вариограмм не столь существенны, чтобы можно было бы отдать предпочтение какой-нибудь конкретной модели. Поэтому мы использовали наиболее часто применяемую сферическую модель.

Моделирование и результаты

На первом этапе была выполнена проверка предположения о том, что совокупность точек может разделиться по набору почвенных характеристик на две группы: старопахотных и новопахотных почв. Для этой цели наиболее эффективным методом является кластерный анализ, в результате которого

сходные по набору параметров точки группируются в кластеры, которые максимально отличаются друг от друга. Для группировки по семи показателям использовали встроенный в *ArcGIS* инструмент *Grouping Analysis*, который использует элементы кластерного анализа и классифицирует объекты на основе их атрибутов и дополнительных пространственных ограничений.

Результат проверки оптимального количества групп показал, что наиболее достоверные различия наблюдаются при разбиении объектов на две группы, что увязывается с первоначальным предположением о макронеоднородности почв, обусловленной разной длительностью земледелия.

В результате точки образовали две относительно пространственно обособленные группы (рис. 2) на юго-востоке (группа 1) и северо-западе (группа 2). Распределение значений показателей внутри групп полностью согласуется с предположением об особенностях изменения свойств почв по отношению к продолжительности обработки.

Для дальнейших операций интерполяции и геостатистического моделирования необходимо выбрать комплексный показатель. Опираясь на аналогичные работы по геостатистическому моделированию почвенных свойств на основе синтетического параметра [19], в качестве критерия использовали интегральный показатель почвенных свойств S_{Σ} .

Дисперсионный анализ двух групп по показателю S_{Σ} подтверждает их достоверное отличие (табл. 1, рис. 3). Так, величина S_{Σ} первой группы в среднем достоверно ($P_{0,95}$) в 1,6 раз меньше, чем во второй группе. Для отдельно взятых групп точек коэффициент вариации значительно меньше, чем для общей выборки, что свидетельствует об их внутренней однородности.

Анализируя гистограммы распределения S_{Σ} , можно сделать вывод, что условная граница между двумя группами соответствует значению $S_{\Sigma} \approx 3,245$.

Полученные кластеры не обладают строгой пространственной сопряженностью точек внутри групп. Данное условие было намеренно задано при анализе группирования, чтобы исключить нивелирование «выбросов», происхождение которых является отдельным предметом обсуждения. Поэтому для построения раstra распределения значений S_{Σ} (рис. 4) использовали метод «жесткой» интерполяции – радиальных базисных функций, который создает непрерывную поверхность, проходящую строго по опорным точкам.

Для обоснования границ перехода недостаточно детерминистических моделей интерполяции. Необходим более глубокий геостатистический анализ распределения почвенных свойств, который

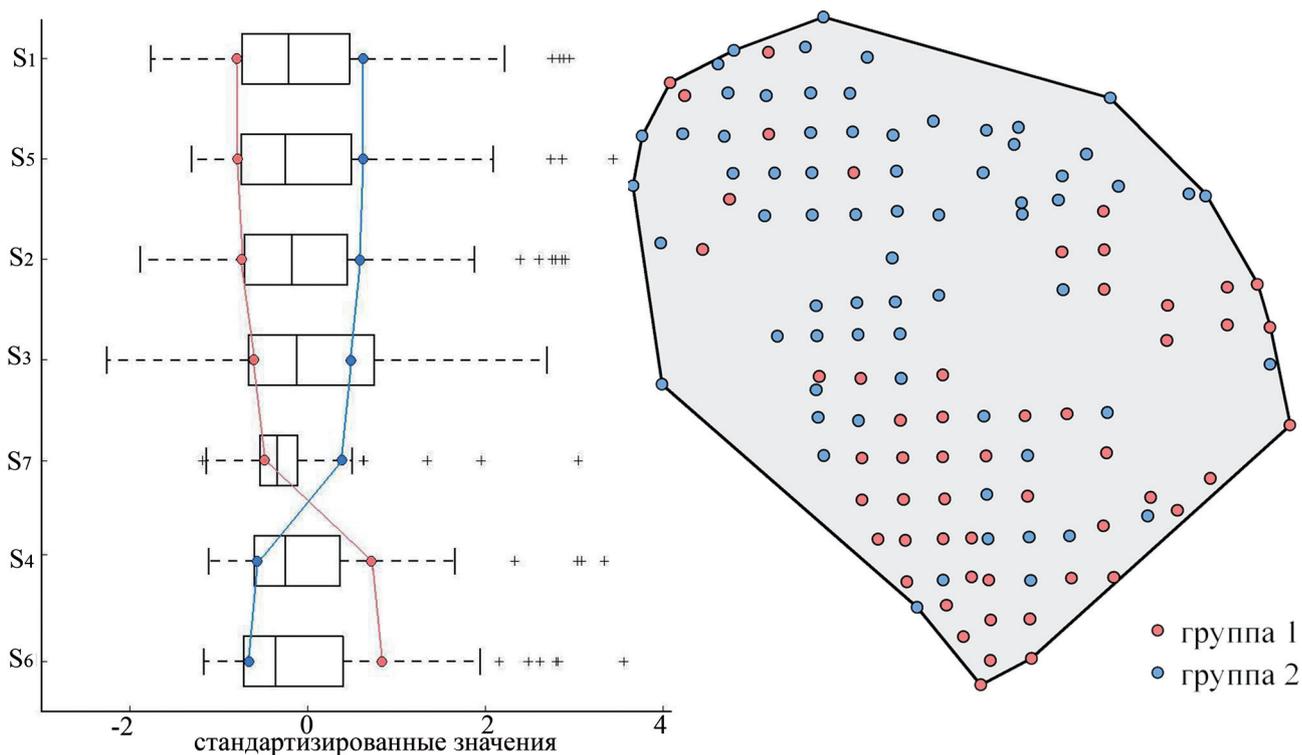


Рис. 2. Распределение значений семи показателей по группам в результате кластерного анализа

Таблица 1

Основные статистические характеристики групп точек по интегральному показателю S_{Σ}

Группа	Количество точек	Размах	Min	Max	Среднее	Дисперсия	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
1	54	1,53	1,74	3,27	2,58	0,12	0,35	14
2	68	3,10	3,22	6,32	4,11	0,53	0,73	18
Общая выборка	122	4,58	1,74	6,32	3,43	0,93	0,97	28

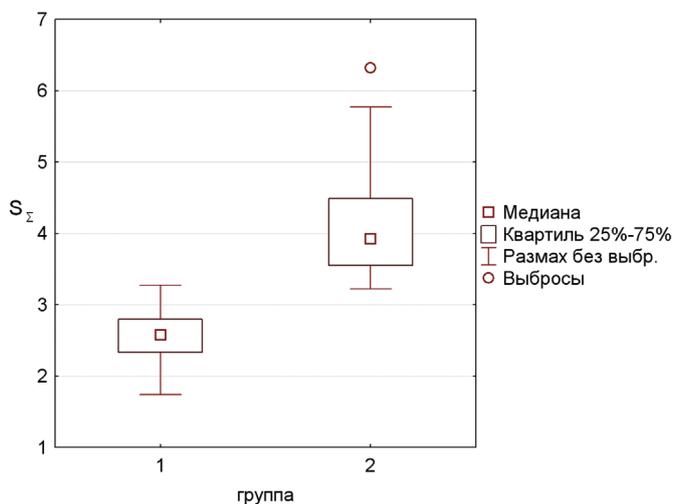


Рис. 3. Диаграмма размаха и статистические характеристики интегрального показателя S_{Σ} для двух кластеров

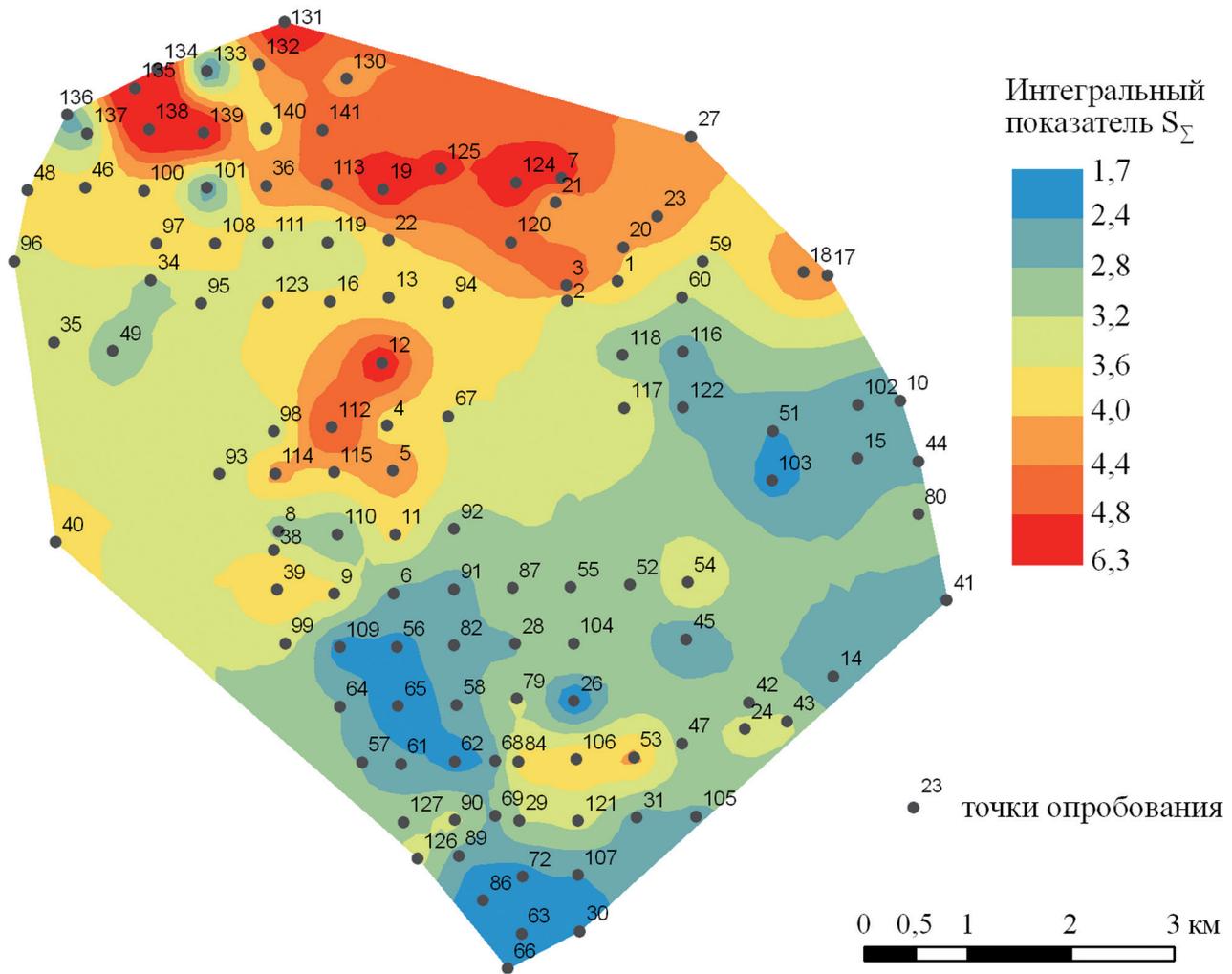


Рис. 4. Распределение значений интегрального показателя S_{Σ} на пахотных землях к северо-западу от Евпатории

позволяет моделировать пространственную корреляционную структуру данных.

Важной задачей геостатистического анализа является корректная интерпретация формы и показателей вариограммы (диаграммы рассеяния), которая может существенно облегчить моделирование распределений данных на двумерной поверхности [20]. Размер лага вариограммы 796 м – среднее расстояние между соседними точками.

Анализ вариограммы позволил раскрыть ярко выраженный пространственный тренд распределения показателя S_{Σ} . В северном и северо-западном направлениях (рис. 5А) средняя дисперсия между парами точек возрастает с удалением их друг от друга. Если рассматривать взаимозависимость показателя в северо-восточном направлении (рис. 5Б), то увеличения автокорреляционной функции с расстоянием не наблюдается, то есть точки одинаково отличаются независимо от рас-

стояния между ними и объекты в целом можно считать однородными.

Предварительный анализ вариограммы показывает, что для распределения значений интегрального показателя S_{Σ} характерна ярко выраженная анизотропия данных. При относительно равномерно распределенных рельефных и почвенно-климатических условиях анизотропия показателей зачастую обусловлена антропогенным фактором [21]. Предполагаемая граница между старопахотными и новопахотными почвами простирается в направлении анизотропии (азимут 64°).

Поскольку невозможно однозначно определить линейную границу зоны древнего земледелия, целесообразно выполнить вероятностную оценку ее местоположения. Поэтому для обоснования границы перехода использовали вероятностный ординарный кригинг с учетом анизотропии данных с условием превышения порогового значения $S_{\Sigma} = 3,245$ (рис. 6).

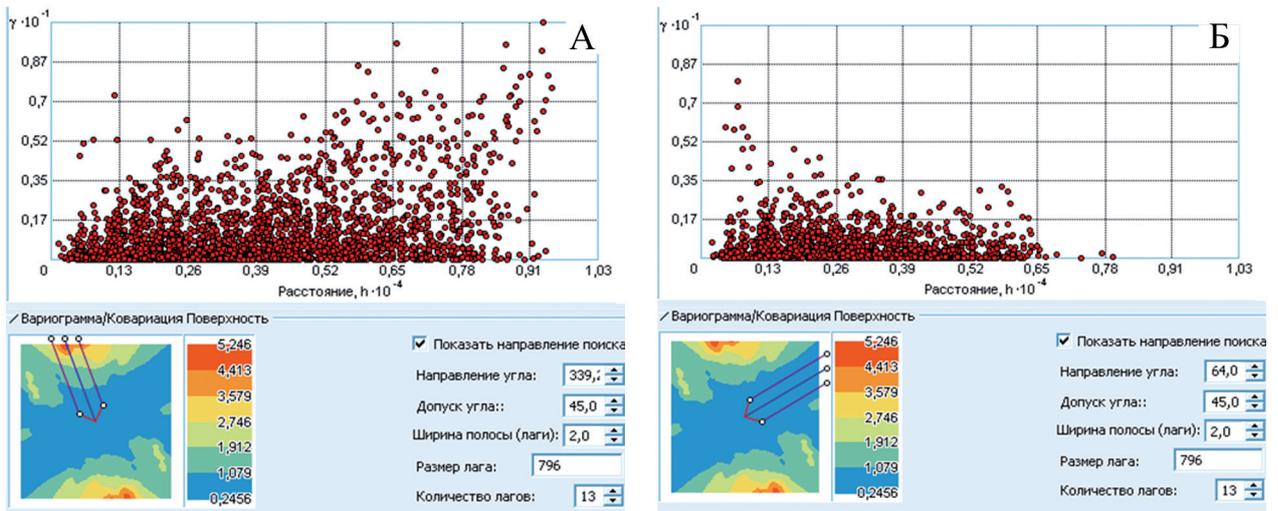


Рис. 5. Облака вариограммы значений интегрального показателя S_{Σ} в зависимости от направления поиска

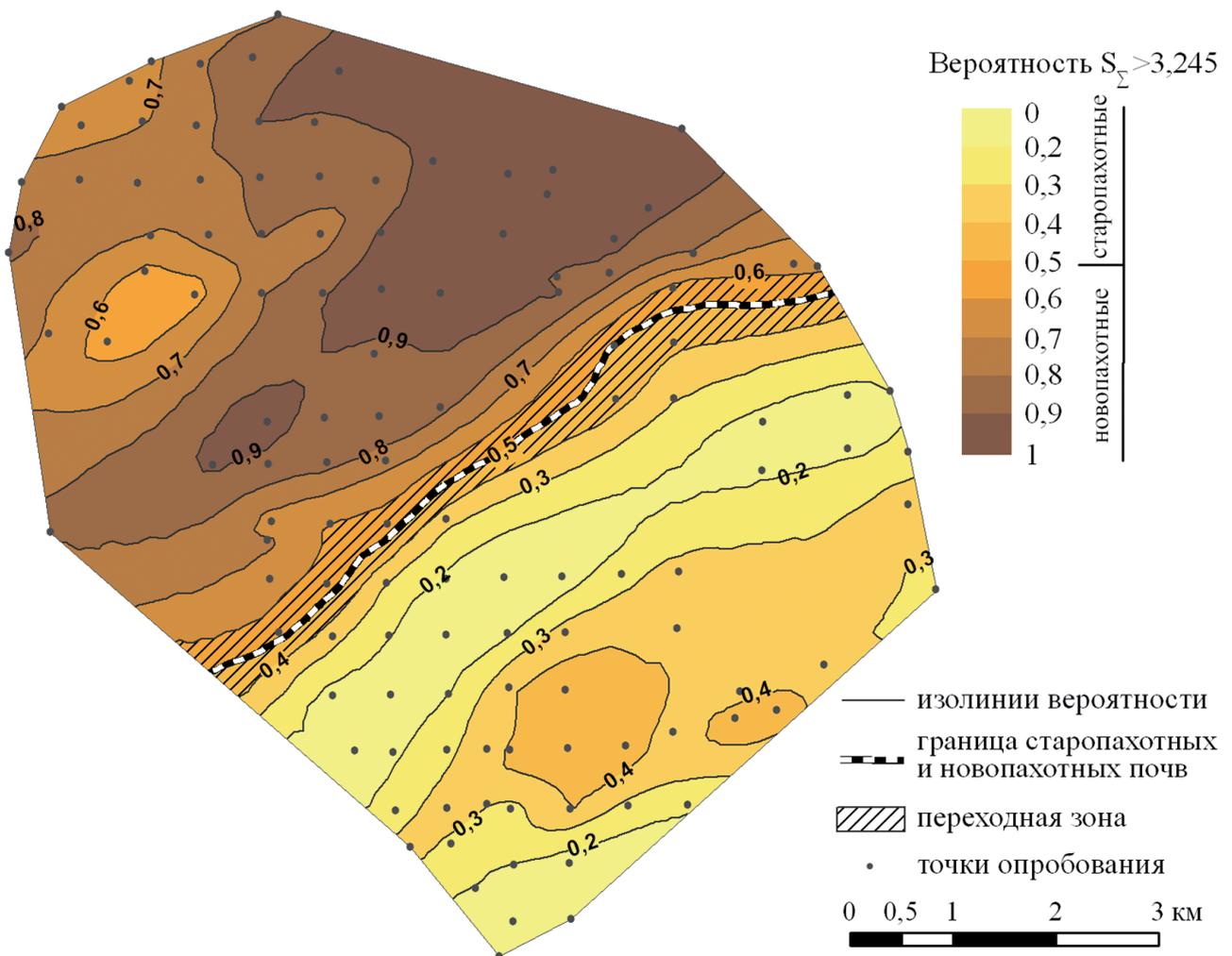


Рис. 6. Предполагаемая граница между старопахотными и новопахотными почвами и оценка вероятности принадлежности территории к одновременной пашне

Окрестность поиска представлена эллипсом с азимутом 64° . Малый радиус влияния – 5576 м, большой – 10348 м.

Опираясь на результаты кригинга, предполагаемую границу между разновременными пашнями можно провести по изолинии с вероятностью $P = 0,5$, которая соответствует граничному значению интегрального показателя S_Σ . В юго-восточном направлении от границы вероятность превышения $S_\Sigma = 3,245$ уменьшается, следовательно, повышается вероятность принадлежности к зоне античного земледелия. Последовательный дисперсионный анализ групп точек внутри границ вероятности (шаг 0,1) по значениям S_Σ показал, что зона, где $0,4 \leq P \leq 0,6$, может считаться переходной, поскольку достоверных отличий среди точек не наблюдается. Эта зона шириной 400-700 м расположена в 6-10 км к западу от Керкинитиды и в 5 км северо-западнее черноморского побережья. С удалением от переходной зоны значения S_Σ в соответствующих диапазонах (0,3-0,4 и 0,6-0,7; 0,2-0,3 и 0,7-0,8; 0-0,2 и 0,8-1) существенно различаются, причем чем больше размах между диапазонами вероятности, тем больше отличаются точки. Область старопашотных почв имеет ширину 3,5-4 км (от границы ареалов плодородных почв, которые расположены в 1-1,5 км от береговой линии, до переходной зоны) и простирается с юго-запада на северо-восток.

Примечательны локальные образования в северной и южной зонах, выбивающиеся из общей картины распределения вероятности. Группа таких точек обуславливает выбросы на вариограмме на расстоянии одного лага (см. рис. 5Б). На северо-западе полигона обособился ареал с $P < 0,6$, что более характерно для приграничной территории. Возможно, она обусловлена античной усадьбой, удаленной от центра полиса. В южном массиве староосвоенных почв также присутствует область, почвы которой, несмотря на близость к Керкинитиде, по свойствам больше похожи на новопашотные. За счет того, что в трех образцах (точки 53, 84, 106) содержание Ca и с ним ассоциированного Sr в 2,5 и в 1,7 раз меньше, а содержание семи тяжелых металлов ($Pb < Cu < Co < Ni < V < Cr < Ba$) на 6% больше, по сравнению со средними значениями показателей в южной части полигона (см. рис. 4), можно допустить, что ареал, вмещающий эти точки, имеет более сложную историю земледелия. В полевых условиях поля, входившие в этот ареал, и близлежащее поле (точка 47) отличались светло-бурой окраской, признаками сильной выпашанности, а в т. 47 встречена амфорная ручка XII-XIV вв. А более активное выщелачивание (по сравнению с фоном) Ca, Na и Mg свидетельствует о более

раннем, чем в XIX в., прерывании режима залежи промежуточным этапом земледелия.

Заключение

Использование методов пространственной статистики и геостатистического анализа в ГИС обеспечило объективное выделение земледельческой границы в сельской округе античного полиса. Карта распределения вероятности прохождения границы разновременной пашни позволила выделить переходную зону земледелия. Результаты интерполяции показали «аномальные» зоны распределения геохимических свойств почв, что может свидетельствовать о локализованных очагах земледелия и присутствии ранее не исследованных археологических объектов. Предложенный методический подход к выявлению зон земледелия различной длительности с использованием геоинформационных технологий обладает эвристическим потенциалом и может быть использован при проведении георхеологических исследований других территорий античного мира.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ. Проект «Георхеология памятников и древнеземледельческих ландшафтов Крыма» № 15-31-10136 а(ц).

Ключевые слова: геостатистика, кригинг, ГИС, античное земледелие, геохимия почв, Керкинитиды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробов Д.С. ГИС-моделирование пахотных угодий эпохи раннего средневековья у алан Кисловодской котловины // Краткие сообщения Института археологии. – 2012. – № 226. – С. 17-27.
2. Korobov D.S., Borisov A.V. The origins of terraced field agriculture in the Caucasus: New discoveries in the Kislovodsk basin // *Antiquity*. – 2013. – V. 87 (338). – P. 1086-1103. – URL: <http://doi.org/10.1017/S0003598X00049887> (date of access 10.04.2016).
3. Lisetskii F., Marinina O., Stolba V.F. Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea // *Geoderma*. – 2015. – V. 239-240. – P. 304-316. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.006> (date of access 12.04.2016).
4. Щеглов А.Н. Северо-Западный Крым в античную эпоху. – Л.: Наука, 1978. – 258 с.
5. Кутайсов В.А. Керкинитиды в античную эпоху. – Киев: Корвин Пресс, 2004. – 326 с.
6. Колтухов С.Г. Скифы Северо-Западного Крыма в VII-IV вв. до н.э. (погребальные памятники) // *Археологический альманах*. – № 27. – Донецк: Донбасс, 2012. – 268 с.
7. Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives // *Geoderma*. – 1999. – V. 89,

- Is. 1-2. – P. 1-45. – URL: [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0) (date of access 10.04.2016).
8. Webster R., Oliver M.A. Geostatistics for environmental scientists, second edition. – Chichester : Wiley, 2007. – 330 p.
9. Геостатистика и география почв / отв. ред. П.В. Красильников. – М. : Наука, 2007. – 175 с.
10. Медведев В.В. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть 1. Введение в проблему. – Харьков : Изд-во «13-я типография», 2007. – 296 с.
11. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 160 с.
12. Сахабиев И.А., Рязанов С.С. Исследование пространственной изменчивости свойств почв с использованием геостатистического подхода // Российский журнал прикладной экологии. – 2015. – № 2. – С. 32-37.
13. Козлов Д.Н., Сорокина Н.П. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. – С. 35-57.
14. Фархутдинов А.М., Фуке Ш., Минцаев М.Ш., Черкасов С.В. Применение геостатистики для анализа перспектив эксплуатации Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод // Геоинформатика. – 2015. – № 1. – С. 60-68.
15. Buraymah I.M., Webster R. Variation in soil properties caused by irrigation and cultivation in the Central Gezira of Sudan // Soil & Tillage Research. – 1989. – V. 1, Is. 13. – P. 57-74. – URL: [http://doi.org/10.1016/0167-1987\(89\)90038-X](http://doi.org/10.1016/0167-1987(89)90038-X) (date of access 10.05.2016).
16. Diacono M., Benedetto D., Castrignanò A., Rubino P., Vitti C., Abdelrahman H.M., Sollitto D., Coccozza C., Ventrella D. A combined approach of geostatistics and geographical clustering for delineating homogeneous zones in a durum wheat field in organic farming // NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences. – 2013. – V. 64-65. – P. 47-57.
17. Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А., Пичура В.И., Буряк Ж.А., Воробьева Е.Я. Эволюционные тренды в геохимии степных почв при их длительном сельскохозяйственном использовании // Российская сельскохозяйственная наука. – 2016. – № 5. – С. 32-36.
18. Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А., Буряк Ж.А., Воробьева Е.Я. Ретрогнозная оценка почв древнеземледельческих районов (на примере сельскохозяйственной зоны к северо-западу от Евпатории) // Europeanresearch. – 2016. – № 4 (15). – С. 68-75.
19. Uyan M. Determination of agricultural soil index using geostatistical analysis and GIS on land consolidation projects: A case study in Konya/Turkey // Computers and Electronics in Agriculture. – 2016. – V. 123. – P. 402-409. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.019> (date of access 14.03.2016).
20. Красильников П.В. Вариография дискретных почвенных свойств // Экология и география почв : сб. научных статей / под ред. П.В. Красильникова. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2009. – С. 10-29.
21. Сидорова В.А. Изменение пространственной вариабельности почвенных свойств в результате антропогенного воздействия // Там же. – С. 30-47.