

Внутрипольное зонирование эрозионных агроландшафтов для использования в технологии точного земледелия

Л. Г. СМЕРНОВА^{1,2}, А. А. КУВШИНОВА¹, М. И. ЕВДОКИМЕНКОВА¹, П. А. УКРАИНСКИЙ²

¹Белгородский федеральный аграрный научный центр РАН, ул. Октябрьская, 58, Белгород, 308001, Российская Федерация

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью оценки пространственного распределения подвижного фосфора и калия в эрозионном агроландшафте методами статистического и цифрового моделирования. Работу выполняли в 2019–2021 гг. в Белгородской области на склоне юго-западной экспозиции, крутизной 1°...7°, на участке площадью 8 га. Преобладающие почвы – черноземы типичные слабосмытые и среднесмытые тяжелосуглинистые. Отбор образцов почвы осуществляли методом катены. Было заложено 8 трансект с 18...20 точками отбора в каждой, координаты которых определяли с точностью +3 м GPS-приёмником Garmin eTrex Vista. С использованием цифровой модели рельефа созданы растры геоморфометрических характеристик: уклона, вертикальной (профильной) и горизонтальной (плановой) кривизны, а также высоты. Из растров в таблицу атрибутов слоя точек отбора извлекали их параметры и формировали группы точек отбора. Влияние вертикальной и горизонтальной кривизны было статистически недостоверно, поэтому дальнейшие сравнения проводили для групп точек отбора по высоте (> 200, 190...200 и < 190 м) и уклону (< 5° и > 5°) с выделением микрозон на их сочетаниях. В микрозонах верхней части склона, независимо от уклона, среднее содержание подвижного фосфора (по Чирикову) в почве составляло 7,8...9,1, калия – 10,5...12,0 мг/кг при соответственно высоком (47...53 %) и среднем (22...27 %) варьировании величин этих показателей. В средней части склона, независимо от уклона, происходило снижение обеспеченности почвы подвижным фосфором, по сравнению с верхней частью склона, на 3,7...4,1 мг/кг. Содержание подвижного калия составляло 8,8...11,5 мг/кг. Вариабельность содержания фосфора была высокой (35...47 %), калия – средней и слабой (10...27 %). Самое низкое количество подвижного фосфора и калия отмечено в почвах нижней части склона – в среднем 4,5 и 9,0 мг/кг при варьировании соответственно 29 и 24 %.

Ключевые слова: пространственное распределение показателей плодородия, точное земледелие, эрозионные агроландшафты, микрозоны склона, содержание фосфора и калия.

Сведения об авторах: Л. Г. Смирнова, доктор биологических наук, ученый секретарь, профессор (e-mail: Lidya.smirnova@yandex.ru); А. А. Кувшинова, младший научный сотрудник; М. И. Евдокименкова, младший научный сотрудник; П. А. Украинский, научный сотрудник.

Для цитирования: Внутрипольное зонирование эрозионных агроландшафтов для использования в технологии точного земледелия / Л. Г. Смирнова, А. А. Кувшинова, М. И. Евдокименкова // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 14–18. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_14.

Infield zoning of erosional agricultural landscapes for use in precision farming technology

L. G. Smirnova^{1,2}, A. A. Kuvshinova¹, M. I. Evdokimenkova¹, P. A. Ukrainskiy²

¹Belgorod Federal Agrarian Scientific Center of the RAS, ul. Oktyabr'skaya, 58, Belgorod, 308001, Russian Federation

²Belgorod State National Research University, ul. Pobedy, 85, Belgorod, 308015, Russian Federation

Abstract. The study aimed to assess the spatial distribution of mobile phosphorus and potassium in an erosive agrolandscape using the methods of statistical and digital modelling. The work was carried out in 2019–2021 in the Belgorod region on a slope of southwestern exposure, crossfall of 1–7 degrees, on an area of 8 hectares. The predominant soils are typical slightly eroded and moderately eroded heavy loamy chernozems. Soil sampling was carried out by the catena method. 8 transects were laid with 18–20 sampling points in each, the coordinates of which were determined with an accuracy of +3 m using a Garmin eTrex Vista GPS receiver. Using a digital elevation model, rasters of geomorphometrical characteristics were created: slope, vertical (profile) and horizontal (planned) curvature, as well as height. From the rasters to the table of attributes of the layer of sampling points, their parameters were extracted and groups of sampling points were formed. The influence of vertical and horizontal curvature was not statistically significant, so further comparisons were made for groups of sampling points in height (> 200, 190–200 and < 190 m) and slope (< 5 degrees and > 5 degrees) with the allocation of microzones on their combinations. In the microzones of the upper part of the slope, regardless of the slope, the average content of mobile phosphorus (according to Chirikov) in the soil was 7.8–9.1, potassium - 10.5–12.0 mg / kg, with a correspondingly high (47–53%) and average (22–27%) variation in the values of these indicators. In the middle part of the slope, regardless of the slope, there was a decrease in the supply of soil with mobile phosphorus, compared to the upper part of the slope, by 3.7–4.1 mg/kg. The content of mobile potassium was 8.8–11.5 mg/kg. The variability of phosphorus content was high (35–47%), potassium - medium and weak (10–27%). The lowest amount of mobile phosphorus and potassium was observed in the soils of the lower part of the slope, 4.5 and 9.0 mg/kg on average, with a variation of 29 and 24%, respectively.

Keywords: spatial distribution of fertility indicators; precision farming; erosive agricultural landscapes; slope microzones; phosphorus and potassium content.

Author Details: L. G. Smirnova, D. Sc. (Biol.), academic secretary, prof. (e-mail: Lidya.smirnova@yandex.ru); A. A. Kuvshinova, junior research fellow; M. I. Evdokimenkova, junior research fellow; P. A. Ukrainskiy, research fellow.

For citation: Smirnova LG, Kuvshinova AA, Evdokimenkova MI, et al. [Infield zoning of erosional agricultural landscapes for use in precision farming technology]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023;37(7):14–18. Russian. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_14.

В последние годы в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства, направленного на получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур, к агротехнологиям предъявляются высокие требования. Они должны учитывать пространственную и временную вариабельность параметров плодородия почв и не приводить к нарушению равновесия агроэкосистем. Основными чертами таких технологий выступают также экономическая эффективность, мини-

мальное отрицательное влияние на окружающую среду, снижение энергетических затрат и повышение окупаемости удобрений и пестицидов. Таким требованиям отвечает технология точного земледелия [1, 2].

Важным элементом в системе точного земледелия служит дифференцированное внесение минеральных удобрений. Их применение для повышения продуктивности агроэкосистем без учета экологических и ландшафтных условий территории приводит к тому, что вносимые удобрения

и пестициды расходуются нерационально. Особенно это актуально для эрозионных агроландшафтов, где в результате денудационных процессов происходит перераспределение веществ вниз по склону. В связи с этим возникает дополнительная внутрипольная вариабельность, которая служит одной из причин неравномерного распределения урожайности в пределах рабочего участка, и, как следствие, снижения эффективности сельскохозяйственных мероприятий [3, 4].

Поэтому возникает задача по созданию актуальных агрохимических карт, которые бы учитывали пространственную неоднородность почвенного покрова, реально отражали состояние плодородия склоновых земель. Современное решение повышения продуктивности земель, подверженных процессам водной эрозии, видится в разработке теоретических и практических основ формирования пространственно-дифференцированных технологий точного земледелия.

Эта проблема затрагивает не только изучение пространственного варьирования показателей плодородия почв, но и выявление свойств почвы, наиболее тесно связанных с урожайностью сельскохозяйственных культур.

Все научно-технологические разработки по изучению пространственной неоднородности почв касаются в основном участков, расположенных на плакорных, выровненных территориях. В условиях Центрально-Черноземной зоны в ее юго-западной части, где больше половины пашни находятся на склонах различной крутизны и экспозиции, остается актуальным вопрос об изучении неоднородности почвенного покрова в условиях склоновых агроландшафтов. Для оценки пространственной вариабельности свойств почв топографический фактор представляется очень важным. К нему можно отнести уклон, форму и тип склона, соотношение основных и боковых направлений стока и экспозицию склона. Сложившаяся сегодня практика ограниченного учета рельефа при возделывании культур совершенно неприемлема в точном земледелии [5, 6, 7].

Картографирование полей по показателям плодородия почвы проводят разными способами. Для выявления пространственной вариабельности почвы, используют методы математической статистики [8, 9, 10], а для картографирования применяют методы цифрового моделирования территории, которые отвечают за точное отражение пространственного распределения показателей плодородия [11, 12].

В исследованиях [13], проведенных во Всероссийском НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, рассматривается следующий подход. Сетку для автоматического отбора проб задают любого масштаба, все зависит от цели картографирования. Для дифференцированного внесения удобрений имеет смысл опираться на ширину захвата опрыскивателей или разбрасывателей удобрений, и выбирать масштаб отбора проб в строгом соответствии с площадью захвата.

В большинстве стран Западной Европы и Северной Америки детальная топосъемка обязательно предшествует почвенному и агрохимическому обследованию. Возникает вопрос об оптимальном шаге пробоотбора при первичном обследовании почвенного покрова [14]. Киндеев А. Л. [15] отмечает, что примерный шаг отбора проб должен составлять 60...70 м. Сахабиев И. А. [7] предлагает поделить исследуемую территорию (100 га) на прямоугольные элементарные участки размером 1,0...1,5 га, в каждом из которых отбирать образцы в количестве 20...25 единичных проб для составления объединенной пробы.

При любом способе отбора образцов почвы для точного земледелия важна оценка пространственной вариабель-

ности показателей.

Поэтому необходимо оценить степень изменения важнейших параметров плодородия, а также определить пространственно-координированные данные и составить электронные карты, по которым можно осуществлять технологические операции.

Цель исследования – оценить пространственное распределение содержания подвижного фосфора и калия в почве эрозионного агроландшафта для дальнейшего использования результатов при реализации технологий точного земледелия.

Условия, материалы и методы. Исследования проводили на территории опытного отделения ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН» в Белгородском районе Белгородской области, северо-западнее города Белгорода. Территориально участок на 300 м удален от села Ерик и от асфальтированной дороги на 1,8 км (рис. 1).

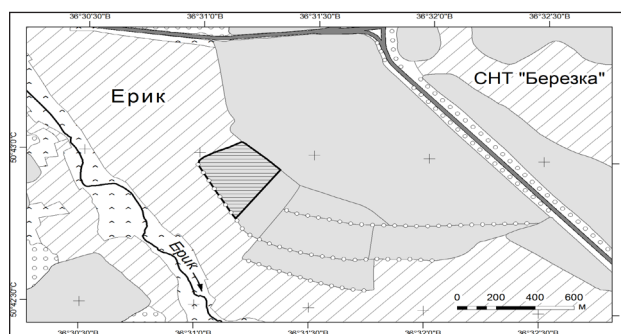


Рис. 1. Общий вид территории исследования; — асфальтированные дороги, — лесополосы, ■ — исследуемый участок, ■ — пашня, ■ — леса, ■ — населенные пункты, ■ — травянистая растительность.

Экспериментальный участок площадью 8 га находится на склоне выпукло-вогнутой формы юго-западной экспозиции, крутизной от 1 до 7°. Почва представлена черноземами типичными маломощными малогумусными слабосмытыми и среднесмытыми. Гранулометрический состав – тяжело-суглинистый и глинистый, содержание гумуса – от 3,95 до 4,60 %; подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно от 4,41 до 9,05 мг/кг и от 9,33 до 11,49 мг/кг, pH_{KCl} – от 5,64 до 6,09 ед. Участок размещен в севообороте со следующим чередованием культур: горох, озимая пшеница, соя, яровая ячмень. Удобрения последние 8 лет не вносили.

Отбор образцов почвы на участке выполняли по регулярной сетке с ячейкой 15 м × 30 м. Было заложено 8 трансект (катен) с 18...20 точками отбора в каждой. Координаты точек определяли с использованием GPS-приёмника Garmin eTrex Vista (с точностью изменения ± 3 м).

На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) были созданы растры уклона, высоты поверхности, вертикальной (профильной) и горизонтальной (плановой) кривизны. С использованием инструмента зональной статистики из растров в таблицу атрибута слоя точек отбора извлекали значения уклона, вертикальной (профильной) и горизонтальной (плановой) кривизны, а также высоты. Все точки отбора делили на следующие группы в зависимости от величин геоморфометрических характеристик: по высоте – на верхнюю (выше 200 м), среднюю (от 190 до 200 м) и нижнюю (ниже 190 м) части участка; по уклону – на менее 5° и более 5°; по вертикальной кривизне – на выпуклые (положительные значения вертикальной кривизны) и вогнутые (отрицательные значения вертикальной кривизны) части склона; по горизонтальной кривизне – на собирающие (отрицательные значения горизонтальной кривизны) и рассеивающие (положительные значения горизонтальной кривизны) части склона.

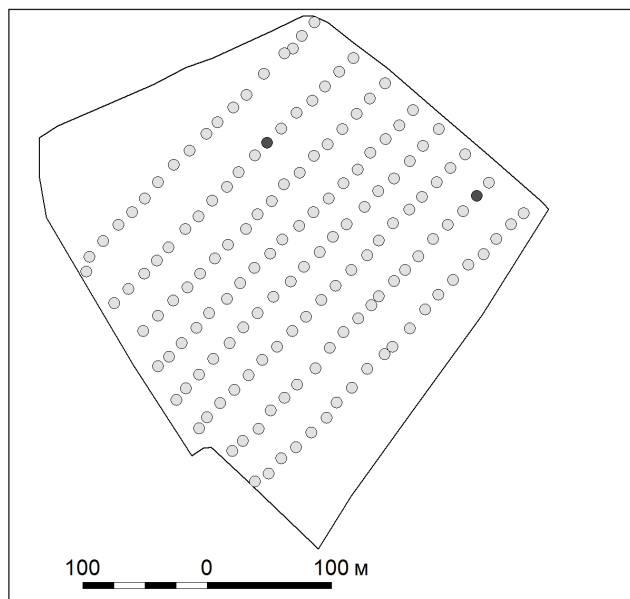


Рис. 2. Агрохимическая картосхема представления пространственных данных в эрозионных агроландшафтах по содержанию подвижного фосфора (по содержанию калия картина выглядит аналогичным образом): ● – низкое, ○ – очень низкое.

Сочетания указанных градаций геоморфометрических характеристик определяли внутрипольные зоны. Для выявления и описания различий между этими зонами по содержанию подвижного фосфора и калия в среде для статистических вычислений R (язык программирования R) был выполнен анализ данных. Он проходил в три этапа. На первом этапе проводили непараметрический многомерный многофакторный дисперсионный анализ (NP MANOVA), на втором – тест Краскола-Уоллиса, позволяющий сравнить медианы нескольких выборок. Статистически значимое ($p < 0,05$) значение H-критерия Краскола-Уоллиса не показывает в какой конкретно паре выборок имеются статистически значимые различия, но указывает на то, что хотя бы для одной из пар выборок медианы различаются.

На третьем этапе выполняли попарные сравнения средних значений с использованием теста Манна-Уитни. Получаемые по результатам этого теста р-значения корректировали с использованием поправки Бонферрони, при использовании которого р-значения, полученные в ходе множественных попарных сравнений, умножают на количество пар сравнений.

Для проведения непараметрического многомерного многофакторного дисперсионного анализа использован дополнительный пакет функций *vegan* – языка программирования R. Процедуры второго и третьего этапов анализа осуществляли с использованием функций, входящих в базовый набор языка R. Содержание подвижного фосфора и калия определяли в аналитической лаборатории «Белгородского ФАНЦ РАН» методом Чирикова (ГОСТ 26204-91).

Для наглядного отображения содержания подвижных форм фосфора и калия при разных условиях мезорельефа строили агрохимические картосхемы с использованием программных средств

ArcGIS. Полученная тематическая карта даёт более широкие возможности для изучения закономерностей распределения показателей плодородия в пространстве. Также для сравнения была разработана агрохимическая картосхема, отображающая содержание подвижного фосфора и калия по степени обеспеченности на изучаемом участке.

Проведение внутрипольного зонирования в эрозионных агроландшафтах для технологии точного земледелия требует ландшафтного подхода, основанного на выявлении микрзон. В проведенных исследованиях рассматривается представление пространственных данных в двух вариантах: агрохимическом, основанном на группировке почв по содержанию показателей; с использованием методов статистики и цифрового картографического моделирования, учитывающего пространственную изменчивость показателей плодородия с выделением их в группы, в зависимости от параметров геоморфометрических характеристик.

Результаты и обсуждение. Согласно группировке по содержанию подвижного фосфора и калия рассматриваемые почвы относятся к группе с очень низкой обеспеченностью этими элементами (рис. 2). Встречаются единичные точки с низким содержанием подвижного фосфора и калия. В случае применения такого представления данных для точного земледелия, картосхема не будет отвечать главным требованиям дифференцированного применения удобрений, где в одну группу входят значения от 0 до 26 мг/кг почвы. Она искажает пространственную информацию, не учитывает особенности склона и пере-

Таблица 1. Результаты непараметрического многомерного дисперсионного анализа (NP MANOVA)

Факторы рельефа	df	Сумма квадратов	R^2	F-критерий	p-значение
Уклон	1	286,90	0,10	20,88	0,001
Высота	2	428,20	0,16	15,58	0,001
Профильная кривизна	1	34,52	0,01	2,51	0,11
Плановая кривизна	1	25,63	0,01	1,87	0,15
Остатки	146	2006,17	0,72	-	-
Всего	151	2781,42	1,00	-	-

движения почвенных масс в результате эрозионных процессов. Поэтому совершенствование подходов в оценке пространственной информации о состоянии содержания подвижного фосфора и калия в эрозионных агроландшафтах представляется важным для построения системы удобрений в точном земледелии.

На совокупность переменных (содержание подвижных фосфора и калия) статистически значимое влияние оказывают уклон поверхности и высота местности (табл. 1). Для

Таблица 2. Статистические показатели содержания подвижного фосфора и калия в почве в выделенных группах сравнения, мг/кг

Группа*	Число значений	Значение показателя			Медиана	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
		минимальное	среднее	максимальное			
Подвижный фосфор							
H ₁ S ₁	34	2,7	7,8	25,1	6,9	4,1	53
H ₁ S ₂	19	4,0	9,1	18,2	8,5	4,5	47
H ₂ S ₁	6	1,4	3,7	5,5	3,7	1,7	47
H ₂ S ₂	41	3,1	5,4	12,8	5,0	1,9	35
H ₃ S ₂	52	1,4	4,5	10,5	4,5	1,3	29
Подвижный калий							
H ₁ S ₁	34	6,4	12,0	26,0	11,4	3,3	27
H ₁ S ₂	19	4,7	10,5	13,0	11,2	2,3	22
H ₂ S ₁	6	10,4	11,5	13,7	11,2	1,2	10
H ₂ S ₂	41	4,6	8,8	13,7	9,7	2,4	27
H ₃ S ₂	52	4,7	9,0	13,0	10,0	2,2	24

*первая буква обозначает высоту расположения на склоне (H_1 – верхняя часть, H_2 – средняя часть, H_3 – нижняя часть); вторая – уклон (S_1 – до 5°, S_2 – более 5°).

этих факторов р-значения не превышают 0,05. Влияние вертикальной (профильной) и горизонтальной (плановой) кривизны статистически незначимо.

Так как из рассмотренных геоморфометрических факторов статистически значимыми оказались только высота и уклон, то дальнейшие сравнения целесообразно проводить для групп наблюдений, выделенных на их сочетаниях. На исследуемом участке выделяется пять таких групп – это микрозона H_1S_1 участка верхней части склона с уклоном до 5° ; H_1S_2 микрозона участка верхней части склона с уклоном более 5° ; H_2S_1 микрозона участка средней части склона с уклоном до 5° ; H_2S_2 микрозона участка средней части склона с уклоном более 5° ; H_3S_2 микрозона участка склона нижней части с уклоном более 5° .

Средние значения содержания подвижного фосфора в выделенных микрозонах варьируют от 3,7 до 9,1 мг/кг, калия – от 8,8 до 12,0 мг/кг (табл. 2). Отмечено высокое и среднее варьирование содержания подвижного фосфора (коэффициент вариации изменяется от 29 до 53 %), что отражает изменчивость и пространственную неоднородность величины этого показателя. Варьирование значений содержания подвижного калия – слабое и среднее (коэффициент вариации составляет 10...27 %).

Результаты теста Краскола-Уоллиса (табл. 3) указывают на то, что для каждой переменной в отдельности по содержанию подвижного фосфора и калия влияние уклона и высоты статистически значимо. По крайней мере в одной из пар сравнений, выделенных по сочетанию высоты и уклона, должны быть статистически значимые различия среднего.

Таблица 3. Результаты теста Краскола-Уоллиса

Переменная	H-критерий	Число степеней свободы (df)	p-значение
Содержание подвижного фосфора	50,37	4	$3,02 \cdot 10^{-10}$
Содержание подвижного калия	37,50	4	$1,42 \cdot 10^{-7}$

Конкретные пары сравнений, в которых есть статистически значимые различия по среднему содержанию подвижного фосфора отмечены в 7 случаях из 10, подвижного калия – в 6 из 10 (табл. 4).

Таблица 4. Результаты попарного выполнения теста Манна-Уитни (величины р-значений)

Группа*	H_1S_1	H_1S_2	H_2S_1	H_2S_2
Содержание подвижного фосфора				
H_1S_2	0,69	–	–	–
H_2S_1	0,02	0,01	–	–
H_2S_2	0,01	0,001	0,21	–
H_3S_2	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$4,50 \cdot 10^{-7}$	0,69	0,03
Содержание подвижного калия				
H_1S_2	1,00	–	–	–
H_2S_1	1,00	1,00	–	–
H_2S_2	$2,80 \cdot 10^{-5}$	0,01	0,02	–
H_3S_2	$2,80 \cdot 10^{-5}$	0,03	0,03	1,00

*первая буква обозначает высоту расположения на склоне (H_1 – верхняя часть, H_2 – средняя часть, H_3 – нижняя часть); вторая – уклон (S_1 – до 5° , S_2 – более 5°).

На основании проведенного статистического анализа была построена графическая картосхема пространственного распределения показателей (рис. 3), где выделяются три микрозоны по высоте (> 200 м, $190...200$ м, < 190 м) и две по уклону ($< 5^\circ$, $> 5^\circ$).

В верхней части склона выделены две микрозоны, в почве которых отмечено наибольшее среднее содержание подвижного фосфора и калия (H_1S_1 – 7,8 и 11,5 мг/кг,

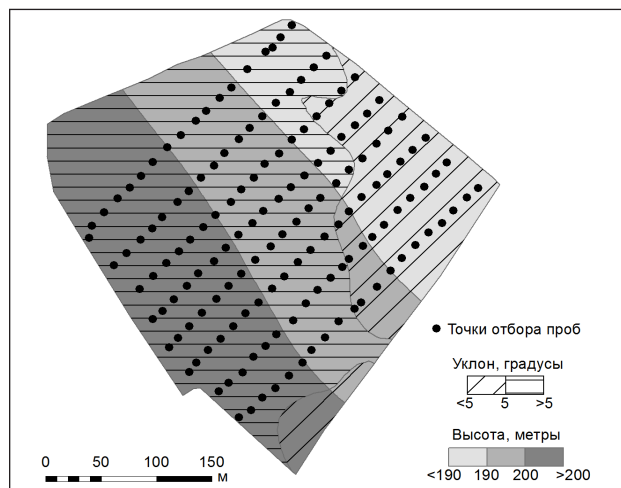


Рис. 3. Графическая модель пространственного распределения содержания подвижного фосфора и калия в микрозонах.

H_1S_2 – 9,1 и 10,5 мг/кг соответственно). В средней части склона также выделены две микрозоны. Среднее содержание подвижного фосфора и калия в почве микрозоны H_2S_2 соответственно на 2,4...3,7 и 1,7...3,0 мг/кг ниже, чем в почве микрозон в верхней части склона. Наименьшее в эксперименте содержание подвижного фосфора отмечено в почве микрозоны H_2S_1 (3,7 мг/кг), однако в ней зафиксировано сравнительно высокое содержание подвижного калия (11,5 мг/кг).

В почве нижней части склона среднее содержание подвижного фосфора и калия снижается до 4,5 и 9,0 мг/кг, что подтверждает статистически значимое влияние уклона и высоты.

Внутрипольное зонирование рабочего участка позволяет более точно рассчитать количество удобрений, в зависимости от пространственной неоднородности почвенного покрова эрозионного агроландшафта. Точная система оценки пространственных данных показателей плодородия в эрозионных агроландшафтах необходима для принятия решения о дифференцированном использовании удобрений в сельскохозяйственном производстве.

Выводы. Анализ содержания подвижного фосфора и калия в почве на агрохимической картосхеме свидетельствуют о низкой и очень низкой обеспеченности этими элементами и отсутствии визуальной пространственной неоднородности по показателям плодородия почвы, что не предполагает различий в дозах применения фосфорных и калийных удобрений. По результатам непараметрического многомерного дисперсионного анализа установлено статистически значимое влияние уклона поверхности и высоты местности на пространственное содержание подвижного фосфора и калия в почве. С учетом геоморфометрических характеристик выделено пять групп или микрозон, в которых средние значения показателей изменялись в зависимости от сочетания уклона поверхности и высоты местности.

Наибольшим содержанием подвижного фосфора (7,8...9,1 мг/кг) и калия (10,5...12,0 мг/кг) отличались почвы микрозоны верхней части склона с соответственно высоким (47...53 %) и средним (22...27 %) варьированием величин этих показателей. В почве средней части склона в микрозоне с уклоном менее 5° отмечено самое низкое содержание подвижного фосфора (3,7 мг/кг), в то время как содержание подвижного калия было высоким и соответствовало уровню верхней части склона (11,5 мг/кг). В почве микрозоны с уклоном более 5° среднее содержание подвижного фосфора на 2,4...3,7 мг/кг, калия – на 1,7...3,0 мг/кг ниже, чем в

верхней части склона. Отмечена высокая (35...47 %) вариабельность подвижного фосфора, средняя и слабая (10...27 %) – калия. В почве микрозоны нижней части склона содержание подвижного фосфора

(4,5 мг/кг) и калия (9 мг/кг) было наименьшим, по сравнению с другими частями склона, при среднем варьировании величин этих показателей (29 и 24 % соответственно).

Литература

1. Труфляк Е. В. Основные элементы системы точного земледелия. Краснодар: КубГАУ, 2016. 39 с.
2. Якушев В. П., Якушев В. В., Матвеев Д. А. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии // *Земледелие*. 2020. № 1. С. 33–37.
3. Пространственная вариабельность агрохимических показателей выщелоченного чернозема лесостепи Алтайского Приобья / В. И. Усенко, Т. А. Литвинцева, Д. В. Часовских и др. // *Достижение науки и техники АПК*. 2017. Т. 31. № 12. С. 9–11.
4. Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing / A. Suleymanov, I. Gabbasova, R. Suleymanov, et al. // *Hungarian Geographical Bulletin*. 2021. Vol. 70. No. 1. P. 49–64.
5. Усовершенствованные теоретические и практические основы формирования пространственно-дифференцированных технологий точного земледелия / Г. Н. Черкасов, Н. П. Масютенко, О. Г. Чуян и др. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2010. 65 с.
6. Самсонова В. П., Мешалкина Ю. Л. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2014. № 3. С. 36–44.
7. Выбор метода геостатистической интерполяции свойств почв государственных сортоиспытательных участков при использовании параметров цифровой модели рельефа / И. А. Сахабиев, С. С. Рязанов, Т. Г. Кольцова и др. // *Почвоведение*. 2018. № 3. С. 259–273.
8. Perspectives on validation in digital soil mapping of continuous attributes. A review / K. Piikki, J. Wetterlind, M. Soderstrom, et al. // *Soil Use and Management*. 2021. No. 37. P. 7–21.
9. Воробьев Н. И., Ладан С. С. Кластерный анализ статистических профилей пространственного распределения гумуса // *Плодородие*. 2021. № 5 (122). С. 33–36.
10. Samsonova V. P., Blagoveshchenskii Y. N., Meshalkina Y. L. Use of empirical bayesian kriging for revealing heterogeneities in the distribution of organic carbon on agricultural lands // *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 3. P. 305–311.
11. Каличкин В. К. Геоинформационное моделирование в изучении трансформации использования земель сельскохозяйственного назначения // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. № 4. С. 70–72.
12. Мыслова Т. Н., Кожеко А. В., Куцаева О. А. Особенности установления зон пространственной неоднородности в пределах землепользования для целей точного земледелия // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 1. С. 192–199.
13. Методика отбора почвенных проб по элементарным участкам поля в целях дифференцированного применения удобрений / В. Г. Сычев, Р. А. Афанасьев, Г. И. Личман и др. М.: ВНИИА, 2007. 36 с.
14. Fu W. Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling // *Precision Agriculture*. 2016. Vol. 17. No. 2. P. 121–136.
15. Киндеев А. Л. Учет пространственной неоднородности кислотности почвы для решения прикладных задач точного земледелия // *Природная и антропогенная неоднородность почв и статистические методы ее изучения: сборник научных статей по материалам научной интернет конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения Е. А. Дмитриева*. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2022. С. 73–79.

References

1. Truflyak EV. Osnovnye elementy sistemy tochnogo zemledeliya [Main elements of the precision farming system]. Krasnodar (Russia): KubGAU; 2016. 39 p. Russian.
2. Yakushev VP, Yakushev VV, Matveenko DA. [Intelligent support systems for technological solutions in precision farming]. *Zemledelie*. 2020;(1):33-7. Russian.
3. Usenko VI, Litvintseva TA, Chasovskikh DV, et al. [Spatial variability of agrochemical parameters of leached chernozem of the forest-steppe of the Altai Ob region]. *Dostizhenie nauki i tekhniki APK*. 2017;31(12):9-11. Russian.
4. Suleymanov A, Gabbasova I, Suleymanov R, et al. Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing. *Hungarian Geographical Bulletin*. 2021;70(1):49-64.
5. Cherkafov GN, Masyutenko NP, Chuyan OG, et al. Usovershenstvovannyye teoreticheskie i prakticheskie osnovy formirovaniya prostranstvenno-differentsirovannykh tekhnologii tochnogo zemledeliya [Improved theoretical and practical foundations for the formation of spatially differentiated technologies for precision farming]. Kursk (Russia): VNIIZiZPE; 2010. 65 p. Russian.
6. Samsonova VP, Meshalkina YuL. [Assessment of the relief role in the spatial variability of agrochemically important soil properties for intensively cultivated agricultural land]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2014;(3):36-44. Russian.
7. Sakhabiev IA, Ryzanov SS, Kol'tsova TG, et al. [Choosing a method for geostatistical interpolation of soil properties in state variety testing plots using the parameters of a digital elevation model]. *Pochvovedenie*. 2018;(3):259-73. Russian.
8. Piikki K, Wetterlind J, Soderstrom M, et al. Perspectives on validation in digital soil mapping of continuous attributes. A review. *Soil Use and Management*. 2021;(37):7-21.
9. Vorob'ev NI, Ladan SS. [Cluster analysis of statistical profiles of the spatial humus distribution]. *Plodorodie*. 2021;(5):33-6. Russian.
10. Samsonova VP, Blagoveshchenskii YN, Meshalkina YL. Use of empirical bayesian kriging for revealing heterogeneities in the distribution of organic carbon on agricultural lands. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(3):305-11.
11. Kalichkin VK. [Geoinformation modelling in the study of the transformation of agricultural land use]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2016;30(4):70-2. Russian.
12. Myslova TN, Kozheko AV, Kutsaeva OA. [Features of establishing zones of spatial heterogeneity within land use for the purposes of precision farming]. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2021;(1):192-9. Russian.
13. Sychev VG, Afanas'ev RA, Lichman GI, et al. Metodika otbora pochvennykh prob po elementarnym uchastkam polya v tselyakh differentsirovannogo primeneniya udobrenii [Soil sampling methodology for elementary field sections for the purpose of differentiated fertilizers application]. Moscow: VNIIA; 2007. 36 p. Russian.
14. Fu W. Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling. *Precision Agriculture*. 2016;17(2):121-36.
15. Kindeev AL. [Accounting for spatial heterogeneity of soil acidity for solving applied problems of precision agriculture]. In: *Prirodnaya i antropogennaya neodnorodnost' pochv i statisticheskie metody ee izucheniya: sbornik nauchnykh statei po materialam nauchnoi internet konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 90-letiyu so dnya rozhdeniya E. A. Dmitrieva* [Natural and anthropogenic heterogeneity of soils and statistical methods for its study: A collection of scientific papers based on the materials of a scientific Internet conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the birth of EA Dmitriev]. Moscow: Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya "Dashkov i Ko"; 2022. p. 73-9. Russian.