

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СВОЙСТВ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ТЕРРИТОРИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СОРТОИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

*И.А. Сахабиев, С.С. Рязанов, Б.Р. Григорьян,
Институт проблем экологии и недропользования Республики Татарстан,
420087, г. Казань, ул. Даурская, д. 28.; ilnassoil@yandex.ru*

На территории интенсивного сельскохозяйственного использования с помощью геостатистических методов проведена оценка пространственной вариабельности свойств почвенного покрова. Пространственный прогноз распределения почвенных свойств осуществляли с помощью метода ординарного кригинга. С учетом вариабельности почвенного покрова составлены карты пространственного распределения исследуемых свойств почв, которые могут быть использованы в управлении сельскохозяйственной деятельностью участков государственной сортоиспытательной сети и мониторинге состояния почв.

Ключевые слова: пространственная вариабельность свойств почв, ординарный кригинг, геостатистика, пространственное моделирование.

Репрезентативные и достоверные результаты исследования долгосрочного эффекта управления сельскохозяйственной деятельностью в большинстве основаны на тщательном выборе тестовых участков для экспериментов, в которых сведены к минимуму различия в почвенном покрове и гранулометрическом составе. Тем не менее, в большинстве случаев недостаточно учитывается пространственное распространение почвенных свойств, которое способно значительно изменить значимость эффекта управления сельскохозяйственным производством. Например, Л. Кнебл с соавт. отмечают, что обнаружение изменений органического углерода почв в зависимости от той или иной практики управления является сложной задачей даже в длительных экспериментах, поскольку пространственная неоднородность в масштабе поля может быть столь же высока, как и эффект долгосрочного управления [8].

Традиционным подходом для устранения влияния вариабельности почвенных свойств на результаты эксперимента является тщательное планирование эксперимента в виде реплицированных, рендомизированных схем, так чтобы любые существующие градиенты в почвенных характеристиках сводились к минимуму [13]. Однако, на практике часто невозможно в полной мере учесть влияние вариабельности почвенных свойств при планировании экспериментов. Поэтому, результаты экспериментов могут быть неверно интерпретированы, могут возникнуть разногласия среди различных экспериментов. Отчасти это связано с тем, что тестовые участки, активно используемые в длительных экспериментах или в сортоиспытательной деятельности, не имеют картографических данных почвенных свойств высокой точности. В то же время широкое развитие в последнее десятилетие методов геостатистического моделирования позволяет с высокой точностью описать вариабельность свойств исследуемых объектов в категориях статистических показателей [3, 9, 10]. Методы геостатистики успешно применяют в точечном

земледелии [11] и в экологических исследованиях состояния почвенного покрова [7, 10, 16].

Цель исследований - оценить и смоделировать пространственную вариабельность свойств почв с помощью геостатистических методов для составления пространственного прогноза распространения свойств почв на территории интенсивного сельскохозяйственного использования.

Методика. Область исследования и методы анализа почв. Исследование пространственной вариабельности почвенного покрова было проведено в Заинском государственном сортоиспытательном участке (ГСУ), расположенном в юго-восточной части Республики Татарстан (55°05'56.0"N 52°02'24.0"E). На протяжении почти 80 лет Заинский ГСУ испытывает постоянное антропогенное воздействие в виде интенсивной сельскохозяйственной деятельности, включающей изучение, оценку сортов и гибридов сельскохозяйственных культур и установление их пригодности для возделывания в условиях производства (рис. 1).

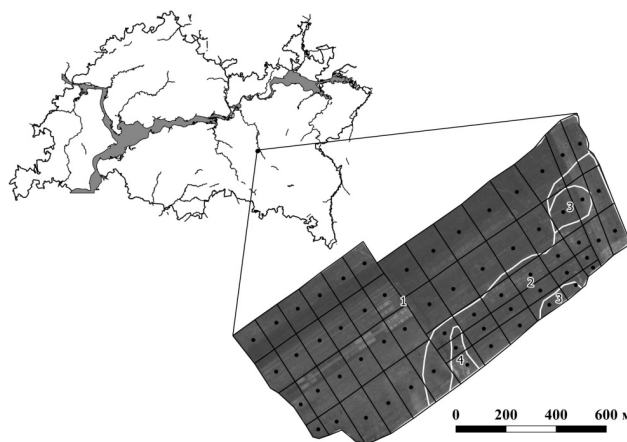


Рис. 1. Расположение участка и схема отбора проб

Территория сортоиспытательного участка занимает площадь около 95 га (~1600 x 630 м). Северная часть участка характеризуется выровненным рельефом, переходящим к слабому пологому склону (< 5°) в южной и особенно юго-восточной частях. Почвенный покров сортоиспытательного участка представлен черноземами выщелоченными тяжелосуглинистыми, которые имеют различные породы и разную степень эродированности. На рисунке 1 представлены элементарные участки с точками отбора проб и почвенные контуры с цифровым обозначением. Контуры выделены на основе картосхемы почвенно-агрохимического обследования территории, проведенного в 1986 г. Расшифровка цифровых обозначений контуров почв приведена ниже.

Номер контура	Почва
1	Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах
2	Чернозем выщелоченный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый слабокаменистый на делювиальных карбонатных глинах, подстилаемых древнеаллювиальными отложениями
3	Чернозем выщелоченный среднегумусный маломощный среднекаменистый тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах, подстилаемых древнеаллювиальными отложениями
4	Чернозем выщелоченный среднегумусный маломощный слабокаменистый слабосмытый тяжелосуглинистый на делювиальных карбонатных глинах, подстилаемых древнеаллювиальными отложениями

Выделение почвенных контуров осуществляется по наличию аллювиальных подстилающих пород, степени эродированности и мощности гумусового горизонта. Наиболее эродированные черноземы расположены в восточной и юго-восточной частях ГСУ, почвы, значительно подверженные эрозии, - в северной части участка.

Отбор почвенных образцов проводили по следующей схеме: территорию поля поделили на 60 элементарных участков размером 0,7-1,5 га, в каждом из которых на глубине 10-20 см отбирали 12-15 образцов для составления объединенной пробы. Элементарные участки выделяли в соответствии с почвенно-агрохимическим обследованием 1986 г. Пространственные координаты объединенных проб были привязаны к центру соответствующих элементарных участков. В образцах определяли: содержание гумуса по Тюрину, содержание подвижных форм фосфора и калия по Чирикову, рН водной вытяжки потенциметрически, содержание легкогидролизующихся форм азота по Корнфилду, содержание нитратного азота ионометрическим методом и гранулометрический состав методом Качинского-Робинсона-Кехля с пробоподготовкой растиранием с пирофосфатом натрия [2, 4].

Методы пространственной оценки. Классические геостатистические методы обеспечивают оценку переменной в каждой точке, применяя хорошо определенную модель пространственной автокорреляции [6, 10]. Ординарный кригинг (ОК) на сегодняшний день является наиболее распространенным типом кригинга в прикладной геостатистике, поэтому его использовали в качестве метода интерполяции [9].

ОК основан на концепции переменной $Z(x)$, которая является случайной и пространственно автокоррелированной [7]. Пространственная структура автокорреля-

ции исследуемых переменных рассчитана с использованием уравнения полудисперсии:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2], \quad (1)$$

где E - математическое ожидание, $Z(x_i)$ - значение целевой переменной на выборочной точке i и $Z(x_i + h)$ - значение соседней точки на расстоянии h .

Перед осуществлением пространственного прогноза исследуемых свойств почв изучали их пространственную структуру и оценивали пространственную зависимость [5]. Пространственную анизотропию оценивали поверхностями вариограмм и вариограммами по направлениям с углом допустимого отклонения $\pm 20^\circ$. С полученными экспериментальными вариограммами сопоставляли теоретические вариограммы и определяли вид и параметры вариограмм. Подобранные модели вариограмм в дальнейшем использовали для пространственной интерполяции методом ординарного кригинга.

Статистическая обработка данных была проведена при помощи статистической среды объектно-ориентированного языка R [14]. Вариограммный анализ и пространственную интерполяцию осуществляли при помощи пакета «gstat» языка R [12].

Результаты и обсуждение. *Предварительный анализ данных.* Содержание гумуса на исследуемом поле меньше минимального со средним коэффициентом вариации [1]. Участок обладает большим количеством элементов питания с сильной вариабельностью значений. Содержание легкогидролизующегося азота характеризуется как высокое, а подвижных форм фосфора и калия варьирует от высоких до очень высоких значений [1]. Содержание физической глины и рН водной вытяжки очень слабо варьируют на территории ГСУ (табл.1).

1. Описательные статистические данные показателей почв

Показатель	Мин.	Среднее	Медиана	Макс.	CV, %	Исходные данные		
						Асимметрия	Экссесс	Значение теста Шапиро-Уилка
Гумус, %	3,95	6,86	6,87	8,05	12,49	-0,84	3,72	0,93
Калий, мг/кг	135,70	176,10	175,40	276,00	13,73	1,33	6,55	0,91
Фосфор, мг/кг	110,60	239,00	217,90	595,10	31,62	1,91	31,62	0,86
Азот лг., мг/кг	156,50	205,80	206,90	272,60	12,27	-0,05	12,27	0,98*
NO ₃ , мг/кг	5,40	10,63	9,10	24,60	43,96	1,22	3,68	0,86
рН _{водн.}	6,00	6,41	6,24	7,78	7,16	1,63	4,52	0,75
Физ. глина, %	35,47	50,72	52,93	58,17	10,50	-1,21	3,53	0,85

*Значимость при уровне $p=0,05$.

Согласно значениям теста Шапиро-Уилка и значениям асимметрии и эксцесса, все исследуемые показатели, кроме легкогидролизующегося азота, не подчиняются закону нормального распределения Гаусса.

Анализ пространственной структуры. Геостатистический прогноз в отличие от оценки классическими

статистическими методами опирается на модели пространственной структуры данных [15]. Параметры теоретических моделей вариограмм представлены в таблице 2.

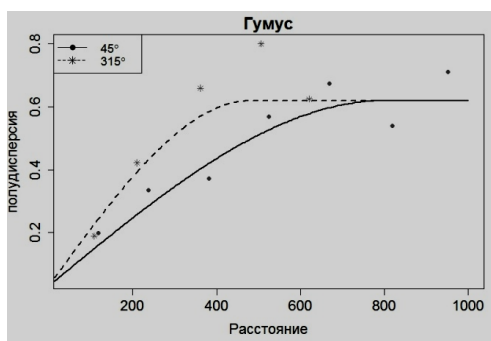
2. Параметры теоретических вариограмм

Показатель	Модель	Диапазон (Range)	Наггет (C ₀)	Частичный порог (C ₁)	Порог (C ₀ +C ₁)	C ₀ / (C ₀ +C ₁)	Анизотропия	
							главное направление	Кэфф.
Гумус, %	Sph	800,45	0,03	0,59	0,62	0,05	45°	0,6
Калий, мг/кг	Sph	500,00	75,00	400,00	475,00	0,16	67,5°	0,75
Фосфор, мг/кг	Sph	656,81	301,29	619,64	649,93	0,05	-	-
Азот лг., мг/кг	Nug	-	-	-	-	-	-	-
NO ₃ , мг/кг	Sph	603,00	12,90	9,20	22,10	0,58	-	-
pH _{водн.}	Sph	841,67	0,14	0,07	0,21	0,69	-	-
Физ. глина, %	Sph	791,87	16,36	11,55	27,91	0,59	-	-

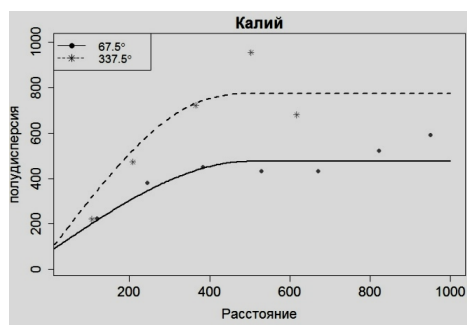
Sph – сферическая модель вариограммы, *Nug* – модель наггет-эффекта.

Пространственная структура распределения гумуса характеризуется геометрической анизотропией в северо-восточном направлении (45°), причиной этого может быть обработка почв (рис. 2 а). В перпендикулярном направлении диапазон пространственной автокор-

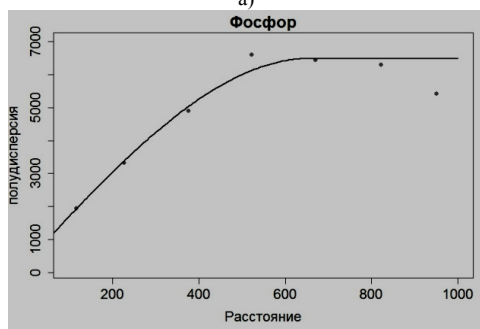
реляции уменьшается и составляет 480 м. Содержание подвижных форм калия, помимо геометрической анизотропии, характеризуется также зональной анизотропией, выраженной в зависимости пространственной автокорреляции от направления (рис. 2 б).



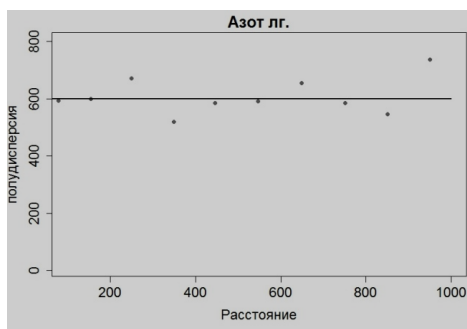
а)



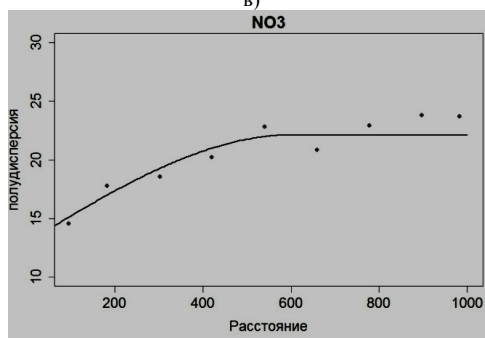
б)



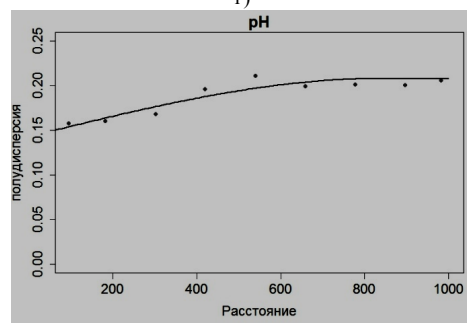
в)



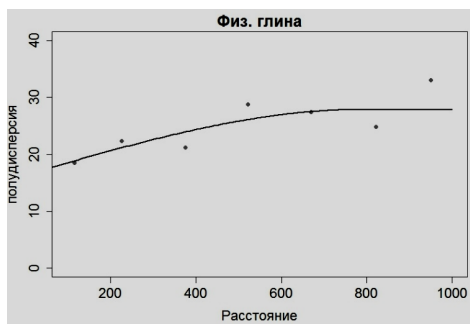
г)



д)



е)



ж)

Рис. 2. Экспериментальные вариограммы почвенных показателей с теоретическими моделями

Пространственная структура остальных показателей описывается изотропными вариограммами (рис. 2). Вариограмма легкогидролизуемого азота имеет форму чистого «наггет-эффекта», что указывает на случайное распределение значений легкогидролизуемого азота в пространстве, не зависящее от расстояния между образцами (рис. 2 з). Подобная картина часто наблюдается, когда пространственная структура проявляется на значительно меньшем расстоянии, чем между центрами элементарных участков. Показатели кислотности почв и содержания физической глины имеют схожую пространственную структуру с одинаковыми радиусами автокорреляции (рис. 2 е, 2 ж). Пространственная структура подвижных форм фосфора характеризуется

сильной автокорреляцией, а структура нитратного азота описывается средней пространственной зависимостью (см. табл. 2).

Результаты интерполяции. На рисунке 3 представлены расчетные карты исследуемых свойств почв, полученные методами ординарного кригинга. Поверх интерполяционных карт наложены почвенные контуры участка. В случае содержания легкогидролизуемых форм азота метод ординарного кригинга не пригоден для описания и прогнозирования пространственной вариабельности в пределах исследуемого участка. Это связано с тем, что вариограмма значений легкогидролизуемого азота представляет чистый "наггет-эффект".

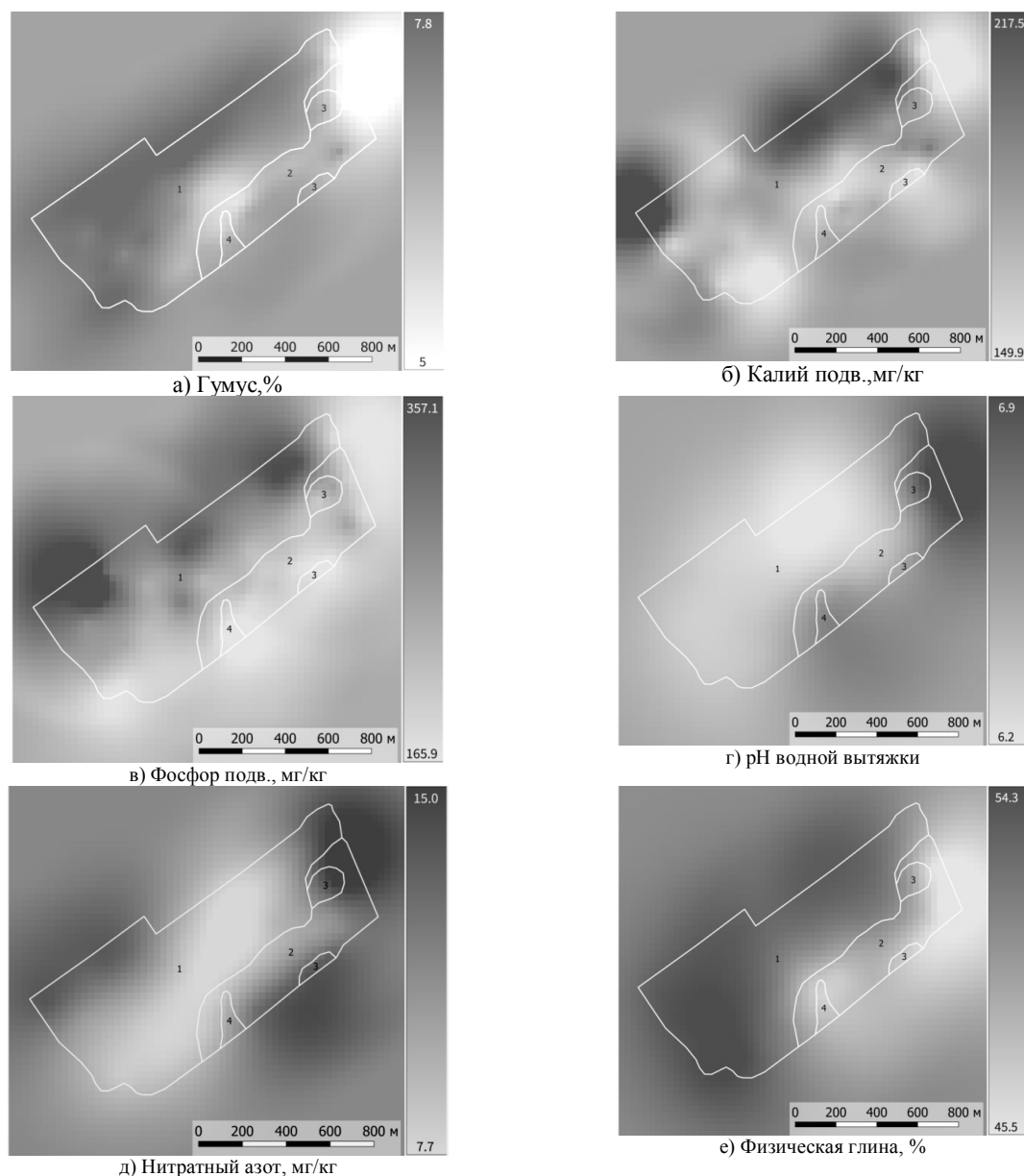


Рис. 3. Карты пространственного прогноза свойств почв, составленные с применением методов ординарного кригинга

Значения агрохимических свойств почв снижаются к южной и юго-восточной частям ГСУ, более высокие значения показателей в северной и северо-западной частях сортоиспытательного участка, которые мало подвержены эрозийным процессам (рис. 3). Об этом можно судить исходя из средних значений исследуемых переменных, рассчитанных для каждого почвенного контура (табл. 3). Средние значения содержания гу-

муса, физической глины, подвижных форм фосфора и калия выше в почвенном контуре 1 по сравнению с другими контурами. Значения pH водной вытяжки повышаются в остальных контурах по сравнению с контуром почв 1. Это согласуется с тем, что вследствие распашки и развития эрозийных процессов в этой области ГСУ происходят уменьшение гумусового горизонта почв и относительное повышение уровня залега-

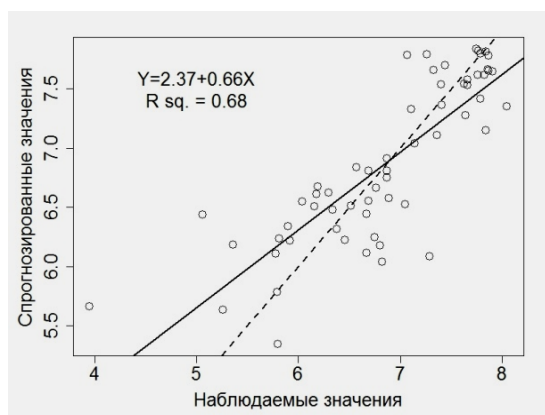
ния карбонатсодержащих горизонтов почв, которые местами могут достаточно близко залегать к поверхности. В случае содержания нитратного азота наибольшее значение имеет контур 3, наименьшее - контур 1. Вероятнее всего причиной такого пространственного распределения нитратного азота являются совокупное действие скорости поглощения азота растениями и его миграция вниз по профилю почв с поверхностными водами.

Для проверки эффективности интерполяции свойств почв исследуемого участка построили графики, показывающие спрогнозированные значения в сравнении с измеренными значениями (рис. 4). На графиках также

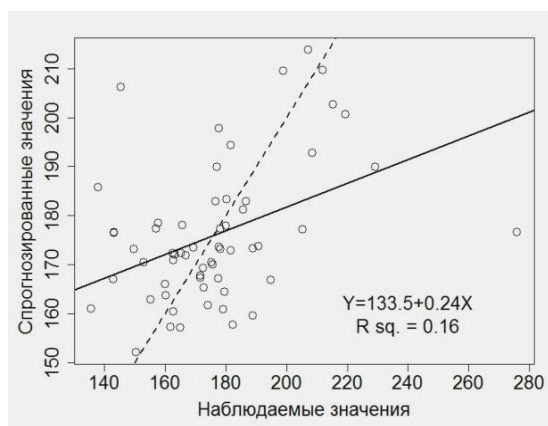
указаны уравнения регрессии и значения скорректированного коэффициента детерминации R^2 .

3. Средние значения исследуемых переменных, рассчитанные для каждого почвенного контура

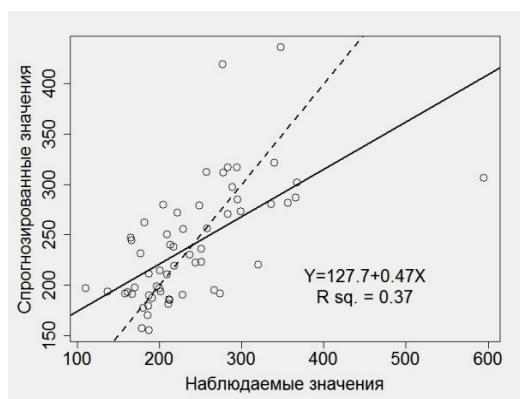
Почва	Гумус	Физ. глина	Калий подв.	Фосфор подв.	Азот нитратный	pH _{водн.}
	%		мг/кг			
1	7,2	52,6	181,5	268,2	9,7	6,3
2	6,2	47,8	169,6	199,1	11,5	6,6
3	6,4	47,9	169,7	198,2	13,6	6,6
4	6,3	47,3	169,1	165,9	9,8	6,6



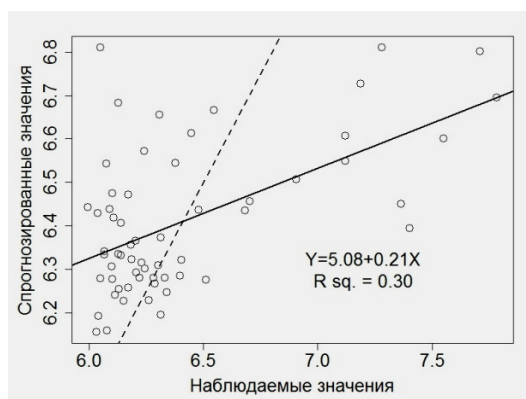
а) Гумус, %



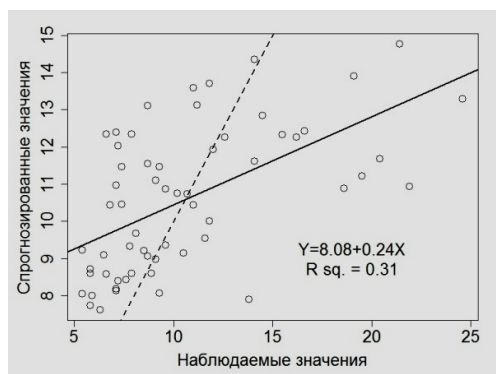
б) Калий подв., мг/кг



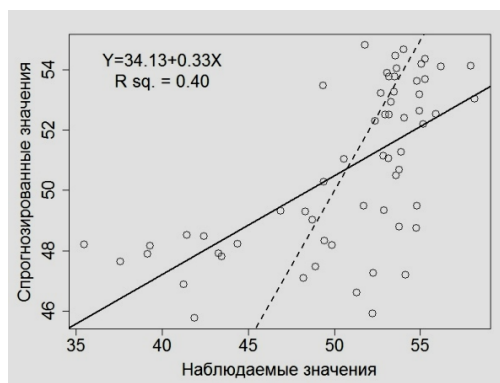
в) Фосфор подв., мг/кг



г) pH водной вытяжки



д) Нитратный азот, мг/кг



е) Физическая глина, %

Рис. 4. Графики спрогнозированных методом ординарного кригинга значений против наблюдаемых значений. Сплошная линия - линия регрессии, пунктирная линия - линия 1:1

Спрогнозированные значения содержания гумуса на 68% описывают пространственную вариабельность наблюдаемых на участке значений ($R^2 = 0,68$) (рис. 4 а). Значения физической глины и подвижного фосфора прогнозируются ординарным кригингом на 40 и 37 % соответственно (рис. 4 в, е). Наименьшую эффективность при пространственном прогнозировании ординарный кригинг показал в случае подвижного калия ($R^2 = 0,16$). В случае нитратного азота и pH водной вытяжки эффективность ординарного кригинга занимала промежуточное положение ($R^2 = 0,30$ и $R^2 = 0,31$ соответственно). Низкая корреляция между предсказанными и измеренными значениями нитратного азота, pH водной вытяжки, подвижных форм фосфора и калия может быть связана с локальным изменением содержания этих переменных, вызванных изменчивостью в условиях окружающей среды и сельскохозяйственной практикой в исследуемой области. Для увеличения точности прогнозирования в подобных случаях следует использовать другие методы интерполяции (регрессионный кригинг с регрессией на главные компоненты, регрессионный кригинг с регрессией частичными наименьшими квадратами, случайные леса), которые включают в свои модели дополнительные вспомогательные переменные (атрибуты рельефа, данные дистанционного зондирования Земли) [15].

В целом распределение агрохимических свойств почв на территории Заинского ГСУ подчиняется действию интенсивного антропогенного прессинга, следствием которого являются эрозийная деятельность, интенсивная сельскохозяйственная обработка почв и применение минеральных удобрений.

Заключение. Современные геостатистические методы позволили провести оценку пространственной вариабельности агрохимических свойств почв и содержания физической глины на территории, испытывающей многолетний антропогенный прессинг в виде интенсивной сельскохозяйственной деятельности. Учитывая вариабельность свойств почвенного покрова, были по-

строены карты пространственного распределения исследуемых свойств почв. Полученные карты могут быть использованы в управлении сельскохозяйственной деятельностью участков государственной сортоиспытательной сети и мониторинге почв.

Литература

1. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. - М.: Росинформагротех, 2003. - 240 с.
2. Практикум по агрохимии/ Под редакцией В.Г. Минеева. - М.: Изд-во МГУ, 2001. - 689 с.
3. Сахабиев И.А., Рязанов С.С. Исследование пространственной изменчивости свойств почв с использованием геостатистического подхода // Российский журнал прикладной экологии. -2015. -№2. - С. 32-37.
4. Шеин Е.В. Курс физики почв. - М.: Изд-во МГУ, 2005. - 432 с.
5. Cambardella C., Moorman T., Novak J., Parkin T., Karlen D., Turco R., Konopka A. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa // Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. -1994. -№58. P. 1501-1511
6. Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resource Evaluation. -Oxford University Press. New York, 1997. -483 p.
7. Heuvelink G. B. M., Webster R. Modelling soil variation: past, present and future // Geoderma. -2001. -№100. -P. 269-301.
8. Knebl L., Leithold G., Brock C. (2015) Improving minimum detectable differences in the assessment of soil organic matter change in short-term field experiments // J. Plant Nutr. Soil Sci. -2015.-№178 -P. 35-42.
9. Lark R.M. Towards soil geostatistics // Spatial Statistics. -2012. -№1. - P. 92-99.
10. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. -2003.- № 117. P. 3-52.
11. Oliver M.A. Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Springer Science+Business Media B.V. -2010. -331 p.
12. Pebesma E.J. (2004) Multivariable geostatistics in S: the gstat package // Computers & Geosciences. - 2004. - № 30. - P. 683-691.
13. Poeplau C., Bolinder M. A., Kätterer T. Towards an unbiased method for quantifying treatment effects on soil carbon in long-term experiments considering initial within-field variation // Geoderma. -2016. - №267. P. 41-47.
14. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016 (URL <http://www.R-project.org/>).
15. Ryazanov S.S., Sahabiev I.A. Comparison of terrain-based drift models to improve the quality of soil predictive mapping at a field scale // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. -2016. -№ 4 (36). -С. 21-33.
16. Webster R., Oliver M.A. Geostatistics for Environmental Scientists. John Wiley & Sons Ltd, 2007. -332 p.

ASSESSMENT OF THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES IN THE NATIONAL CROP TESTING TERRITORY

I.A. Sakhabiev, S.S. Ryazanov, B.R. Grigor'yan

*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
ul. Daurskaya 28, Kazan, 420087 Republic of Tatarstan, Russia
E-mail: ilnassoil@yandex.ru*

The spatial variability of several soil properties in the area of intensive agricultural activity was assessed using geostatistical methods. Spatial prediction mapping was performed using ordinary kriging. The interpolated maps obtained with consideration for spatial variability can provide useful information for agricultural management and monitoring of the soil cover.

Keywords: spatial variability of soil properties, ordinary kriging, geostatistics, spatial modeling.