



А. В. Жуков, Г. А. Задорожная, Е. В. Андрусевич  
**ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ОТБОРА ПОЧВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ НА  
ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ  
ТЕХНОЗЕМОВ**

*Днепропетровский государственный аграрный университет*

Показана возможность оценки пространственной изменчивости эдафических свойств техноземов методом кригинга по 20 точкам, положение которых установлено по алгоритму spatial response surface sampling (SRSS) на основании данных электропроводности почв в 160 точках отбора проб, заложенных по регулярной сетке. С помощью многомерного факторного анализа установлены наиболее информативно важные эдафические показатели: концентрация иона кальция, pH водной вытяжки, сумма ионов калия и натрия в водной вытяжке, содержание гумуса в техноземах. Предложенная схема отбора проб позволяет получить интегральные статистические оценки параметров распределения данных показателей, которые при малом объеме выборки достоверно не отличаются от оценок, полученных при большом объеме собранного материала. Организация сбора проб по алгоритму SRSS по данным электропроводности почв позволяет получить удовлетворительное пространственное отображение изменчивости признаков, которые коррелируют с электропроводностью. В нашем исследовании это концентрация одновалентных ионов ( $Ka^{+}+Na^{+}$ ) в почвенной вытяжке и количество гумуса в техноземах.

*Ключевые слова:* электрическая проводимость почв, отбор проб, пространственная изменчивость, рекультивация.

О. В. Жуков, Г. О. Задорожна, К. В. Андрусевич  
**ОПТИМАЛЬНА СТРАТЕГІЯ ВІДБОРУ ҐРУНТОВИХ ЗРАЗКІВ НА ПІДСТАВІ  
ДАНИХ ПРО ЕЛЕКТРИЧНУ ПРОВІДНІСТЬ ТЕХНОЗЕМІВ**

*Дніпропетровський державний аграрний університет*

Показано можливість оцінки просторової мінливості едафічних властивостей техноземів методом крігінгу по 20 точкам, розположення яких встановлено за алгоритмом spatial response surface sampling (SRSS) на підставі даних про електропровідність ґрунтів в 160 точках відбору проб, закладених по регулярній сітці. За допомогою багатовимірного факторного аналізу встановлені найбільш інформативно важливі едафічні показники: концентрація іона кальцію, pH водної витяжки, сума іонів калію й натрію у водній витяжці, вміст гумусу в техноземах. Запропонована схема відбору проб дозволяє одержати інтегральні статистичні оцінки параметрів розподілу даних показників, які при малому обсязі зібраного матеріалу. Організація збору проб по алгоритму SRSS по даним електропровідності ґрунтів дозволяє одержати задовільне просторове відображення мінливості ознак, які корелюють із електропровідністю. У нашому дослідженні це концентрація одновалентних іонів ( $Ka^{+}+Na^{+}$ ) у ґрунтовій витяжці й кількість гумусу в техноземах.

*Ключові слова:* електрична провідність ґрунтів, відбір проб, просторова мінливість, рекультивация.

O. V. Zhukov, G. A. Zadorozhnaya, Ye. V. Andrusевич  
**THE OPTIMAL STRATEGY OF THE SOIL SAMPLING ON THE BASIS OF THE  
TECHNOSEMS ELECTRICAL CONDUCTIVITY DATA**

The possibility of an estimation of spatial variability of edaphic properties of industrial lands have been shown by Kriging of the 20 points which position have been established according algorithm of spatial response surface sampling (SRSS) on the basis of soil electrical conductivity data in 160 sampling points which have been situated on a regular grid. are established The most informatively important edaphic indicators have been established by means of the multidimensional factor analysis: concentration of an ion of calcium, pH a water extract, the sum of ions potassium and sodium in a water extract, the humus content. The offered scheme of sampling allows receiving integrated statistical estimations of parameters of distribution of the given indicators which samples at small volume authentically do not differ from the estimations received at great volume of the collected material. The organization of gathering of tests on algorithm SRSS by data soil electrical conductivity allows to receive satisfactory spatial model of variability of properties which correlate with electrical conductivity. In our research it is concentration of monovalent ions ( $Ka^{+} + Na^{+}$ ) in a soil extract and humus contamination.

*Key words: soil electrical conductivity, data sampling, spatial variability, recultivation.*

Существуют различные подходы для выявления и картирования почвенных условий, которые влияют на пространственную изменчивость продуктивности сельхозкультур. Для выполнения этой задачи может быть использована интенсивная стратегия отбора почвенных образцов в ячейках регулярной сетки. Такой подход позволил R. Lark (1997) выявить семь картографических единиц (интервал сетки в исследовании составил 20 м, площадь поля – 6 га). Установлены значительные различия между картографическими единицами для ряда показателей, влияющих на урожай, таких как влажность и органическое вещество почвы, минеральный азот, pH. Однако, такой тип интенсивного сбора данных по ячейкам регулярной сетки является трудозатратным и дорогим, что делает его непрактичным для применения в реальных производственных условиях. В работе Francis, Schepers (1997) был применен метод выборочного сбора почвенных образцов для определения границ зон применения удобрений. Определение мест отбора проб производилось на основе сведений о цвете почвы, текстуры, угле наклона поверхности, эрозионных характеристиках. В пределах выделенных зон наблюдалось достоверное различие в содержании таких питательных веществ, как калий и фосфор, а также цинк. Однако такого рода исследования недооценивают необходимость экономичной технологии для выявления пространственной изменчивости эдафических свойств.

Поскольку эдафические свойства влияют на наблюдаемую электропроводность почвы ( $EC_a$ ), пространственное распределение этого показателя в пределах поля обеспечивает потенциальную возможность картирования пространственной изменчивости эдафических свойств, основываясь на отборе почвенных проб, место отбора которых определяется по  $EC_a$ . Характеристика пространственной изменчивости с помощью  $EC_a$ -направленной системы сбора проб основывается на гипотезе, что если  $EC_a$  коррелирует с почвенными свойствами либо свойством, то пространственная информация о  $EC_a$  может быть использована для идентификации участков, которые отражают диапазон и изменчивость этих свойств, либо свойства.

В случае, когда  $EC_a$  коррелирует с определенным почвенным свойством, то  $EC_a$ -направленная система сбора образцов позволит установить пространственное распределение этого свойства, а также оптимальное количество и места положения отбора проб для характеристики изменчивости при минимизации трудозатрат (Corwin et



al., 2003). Также, если  $ЕС_a$  коррелирует с урожайностью, то  $ЕС_a$ -направленная система отбора образцов может быть использована для идентификации почвенных свойств, которые влияют на изменчивость урожайности (Corwin et al., 2003).

Базовыми элементами изучения  $ЕС_a$  на уровне сельскохозяйственного поля для характеристики пространственной изменчивости являются:

- план изучения  $ЕС_a$ ;
- сбор пространственно-определенных данных о почвенном  $ЕС_a$ ;
- план отбора почвенных образцов для агрохимического анализа, разработанный на основе пространственно определенных данных об  $ЕС_a$ ;
- сбор почвенных образцов;
- пространственный статистический анализ;
- определение главных почвенных свойств, которые влияют на  $ЕС_a$  в пределах изучаемого участка;
- ГИС-реализация (создание базы пространственных данных, визуализация пространственного распределения почвенных свойств).

Важно отметить, что геопространственные измерения  $ЕС_a$  сами по себе не могут прямо характеризовать пространственную изменчивость почвенных свойств. В действительности, измерение  $ЕС_a$  дают ограниченную прямую информацию о физико-химических свойствах почвы, которые влияют на урожай, воздействуют на транспорт растворенных веществ или определяют качество почвы. Однако наблюдения за изменением в пространстве  $ЕС_a$  обеспечивают информацией, необходимой для организации сбора агрохимических образцов. Такой подход является экономичным средством для оптимизации сбора данных о почве.

$ЕС_a$ -направленный сбор данных может позволить пространственно охарактеризовать почвенные свойства, которые коррелируют с  $ЕС_a$ . Эта корреляция может возникать вследствие прямого или косвенного влияния свойств почвы на  $ЕС_a$ , либо эта корреляция может быть артефактом. Существует сложная связь между  $ЕС_a$  и почвенными свойствами. Наблюдаемая электрическая проводимость почвы является сложным показателем, интерпретация которого требует знаний и опыта. Непосредственный отбор агрохимических образцов в поле дает возможность понимания и интерпретации данных по  $ЕС_a$ . Без агрохимических данных наблюдения за изменением  $ЕС_a$  имеют небольшое значение.

Геопространственные измерения  $ЕС_a$  не заменяют сбор агрохимических данных, но могут существенно минимизировать их число, необходимое для характеристики пространственной изменчивости. Единственным способом установить, какое из почвенных свойств влияет на  $ЕС_a$  в условиях конкретного поля, состоит в отборе агрохимических проб и проведении статистического анализа. Таким образом, каждое измерение электрической проводимости почвы в пределах поля должно сопровождаться отбором агрохимических данных в точках, которые определяют сообразно пространственной изменчивости  $ЕС_a$ . Отбор агрохимических анализов должен проводиться как минимум в 8–16 точках. Места расположения точек отбора проб и их число могут быть определены на основании таких программных продуктов, как например ESAP (Corwin, Lesch, 2003).

Стабильность  $ЕС_a$  во времени может быть предметом особого интереса, так как этот показатель является результатом взаимодействия статических и динамических факторов. Временной аспект добавляет сложности рассмотрения и интерпретации пространственной изменчивости  $ЕС_a$ . Особое значение аспект времени приобретает в

том случае, когда среди факторов, влияющих на электропроводность, преобладают динамические.

Изменение значений  $EC_a$  является результатом действия статических и динамических факторов, таких как соленость, содержание глины, минералогические особенности, содержание воды, плотность почвы и температура (Johnson et al., 2003). Величина и пространственная гетерогенность  $EC_a$  в поле подвержены влиянию одного или двух из этих факторов, перечень которых может изменяться от одного поля к другому, делая интерпретацию измерений  $EC_a$  существенно сайт-специфичной. В ситуации, когда динамические почвенные свойства (соленость, содержание влаги, температура) преобладают в воздействии на  $EC_a$ , изменения пространственного распределения этого показателя во времени будут очень существенными по сравнению с теми системами, когда преобладающими являются статические факторы (текстура). В текстуро-определяемых системах характер пространственного распределения электропроводности почвы остается стабильным, так как изменения динамических почвенных свойств влияют только на величину  $EC_a$ . Таким образом, карты  $EC_a$  для статически-определяемых систем несут значительно отличную информацию от карт  $EC_a$  для динамически-определяемых систем (Johnson et al., 2003).

В настоящее время применяются два подхода для проведения  $EC_a$ -направленного сбора почвенных образцов:

- дизайн-основанный сбор образцов;
- модель-основанный сбор образцов.

Первый подход состоит в применении неконтролируемой классификации (Johnson et al., 2001), а второй подход направлен на оптимизацию поверхности пространственного отклика (*spatial response surface* – SRS) плана сбора данных (Corwin, Lesch, 2005). При выполнении дизайн-основанного отбора проб производится картографическое отображение пространственной изменчивости электропроводности (рис. 1).

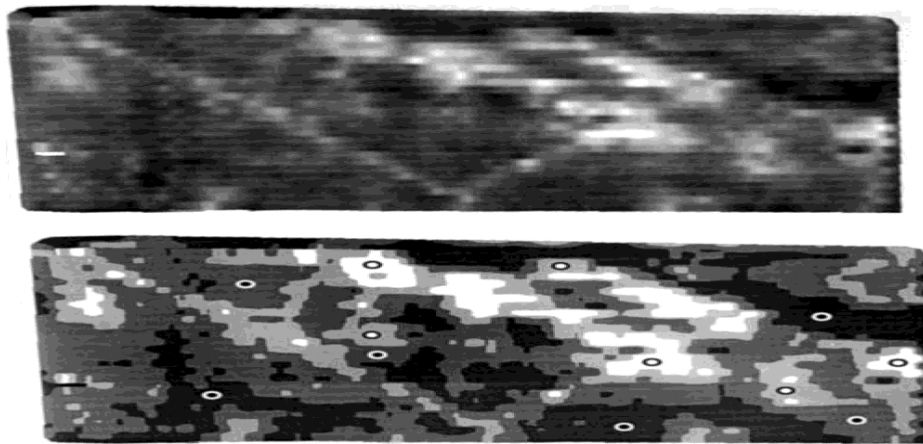


Рис. 1. Карта электрической проводимости почвы в пределах поля (вверху) и та же карта после перекодировки значений в четыре класса электропроводности (внизу). По Johnson et al., (2001).

Вариации интенсивности окраски, от темной к светлой, соответствуют увеличению электропроводности. Кругами обозначены места отбора проб.



Карта электропроводности может быть реклассифицирована в категории по уровню электропроводности. Так, в работе Johnson et al. (2001) таких классов выбрано четыре. Выбор этого числа был достаточно субъективным, в качестве аргументов приводится практичность (ограничение сверху) и возможность охватить изучаемую территорию (ограничение снизу).

В пределах каждого класса электропроводности пробы были отобраны в трех точках. Точки располагались в четко обособленных областях классов с тем, чтобы максимально охватить изучаемую территорию. Точки отбора были центрированы в пределах пространственной области класса, чтобы избежать переходных зон. Несмотря на то, что важный этап определения расположения точек отбора проб можно формализовать (очевидно, что точками отбора проб являются центры тяжести трех максимальных по площади полигонов, соответствующие каждому классу), в обсуждаемой работе этого сделано не было и в процедуре определения имеет место субъективная компонента.

В целом, дизайн-основанный отбор образцов превосходит по информационной ценности классический случайный способ отбора проб, т.к. учитывает пространственную неоднородность почвенного покрова. Кроме того, средние по полю значения почвенных параметров основанные на этом подходе имеют меньшую стандартную ошибку, чем при случайном отборе проб (Johnson et al., 2001).

Для выполнения модель-основанного подхода для определения мест расположения точек отбора проб на поле при изучении пространственной изменчивости почвенных свойств используется специализированное программное обеспечение, как например ESAP (<http://www.ars.usda.gov/services/software/>). Программа ESAP использует план отбора проб, основанный на пространственной модели поверхности отклика (*spatial response surface sampling – SRSS*). Алгоритм SRSS позволяет определить место расположения минимального количества точек отбора почвенных проб на основании информации о пространственном изменении величины электропроводности почвы.

Целью настоящей работы было установить на основании данных об электропроводности техноземов оптимальную схему размещения точек отбора проб почвы для того, чтобы полученные данные позволили без искажений отобразить наиболее важные особенности пространственной изменчивости эдафических свойств, влияющих на первичную продуктивность растительного сообщества на участке рекультивации.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работы проведены на научно-исследовательском стационаре Днепропетровского государственного аграрного университета в г. Орджоникидзе. Экспериментальный участок по изучению оптимальных режимов сельскохозяйственной рекультивации был создан в 1968 – 1970 гг. Отбор проб произведен в пределах поля, которое охватывает такие варианты техноземов: дерново-литогенные почвы на лесах, на серо-зеленых глинах, на красно-бурых глинах и педоземы с насыпным слоем чернозема мощностью 0,5 м на технической смеси глин (географические координаты юго-западного угла полигона – 47°38'55.24"с.ш., 34°08'33.30"в.д.).

На участке с 1995 до 2003 г. произрастал многолетний бобово-злаковый агрофитоценоз (Шемавнев и др., 2005), после чего начался процесс натурализации растительного покрова.



Полигон представлен 8 трансектами, каждая из которых состоит из 20 точек отбора проб. Трансекты расположены в направлении с запада на восток с интервалом 15 м между соседними трансектами. Точки отбора проб также находятся с интервалом 15 м. Таким образом, экспериментальный полигон представляет собой регулярную сетку с шириной ячейки 15 м. Длина большей стороны полигона равна 285 м, меньшей – 105 м.

Для проведения измерения электропроводности почвы *in situ* создан ряд приборов, к числу которых относится сенсор HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, R. I.). Этот сенсор работает совместно с портативным прибором HI 993310. Тестер оценивает общую электропроводность почвы, т.е. объединенную проводимость почвенного воздуха, воды и частиц. Результаты измерений прибора представлены в единицах насыщенности почвенного раствора солями – г/л. Сравнение результатов измерений прибором HI 76305 с данными лабораторных исследований позволили оценить коэффициент перевода единиц как  $1 \text{ дС/м} = 155 \text{ мг/л}$  (Родин и др., 1968).

Измерение фитомассы производилось в пределах квадратов с боковой стороной 0,5 м. Сбор материала проведен в июне 2009 г. Растения срезались под корень в середине дня, между сходом утренней росы и началом образования вечерней, связывались в снопы и были доставлены в лабораторию, где их взвешивали (Шемавнев и др., 2005).

Солевой состав почв определялся методом водной вытяжки с расчетом количества солей в % (ГОСТ 26423, ГОСТ 26424, ГОСТ 26425, ГОСТ 26426, ГОСТ 26427, ГОСТ 26428, ДСТУ ISO 10390, ДСТУ ISO 11265).

Статистические расчеты проведены с помощью программы Statistica 7.0, двухмерное картографирование и оценка геостатистических показателей проведено с помощью программы Surfer 8.0, определение оптимального размещения точек отбора проб по данным об электропроводности почвы произведено с помощью программы ESAP-RSSD Version 2.35R.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственная изменчивость электропроводности техноземов исследованного участка представлена на рис. 1.

На карте четко выделяются две области с пониженной электропроводностью, которые географически соответствуют участкам залегания дерново-литогенных почв на лесах и педоземов с насыпным слоем чернозема. Область с повышенной электропроводностью маркирует дерново-литогенные почвы на красно-бурых глинах. Промежуточными значениями характеризуются дерново-литогенные почвы на серозеленых глинах.

Вариограмма электропроводности техноземов характеризуется радиусом влияния 93 м и значением индекса SDL 46,15 %, что позволяет оценить степень пространственной зависимости электропроводности как умеренную.

С помощью алгоритма SRSS на основании данных о пространственной изменчивости электропроводности определено оптимальное положение 20 точек отбора почвенных проб для отображения пространственной изменчивости агрохимических свойств почвы (рис. 1).

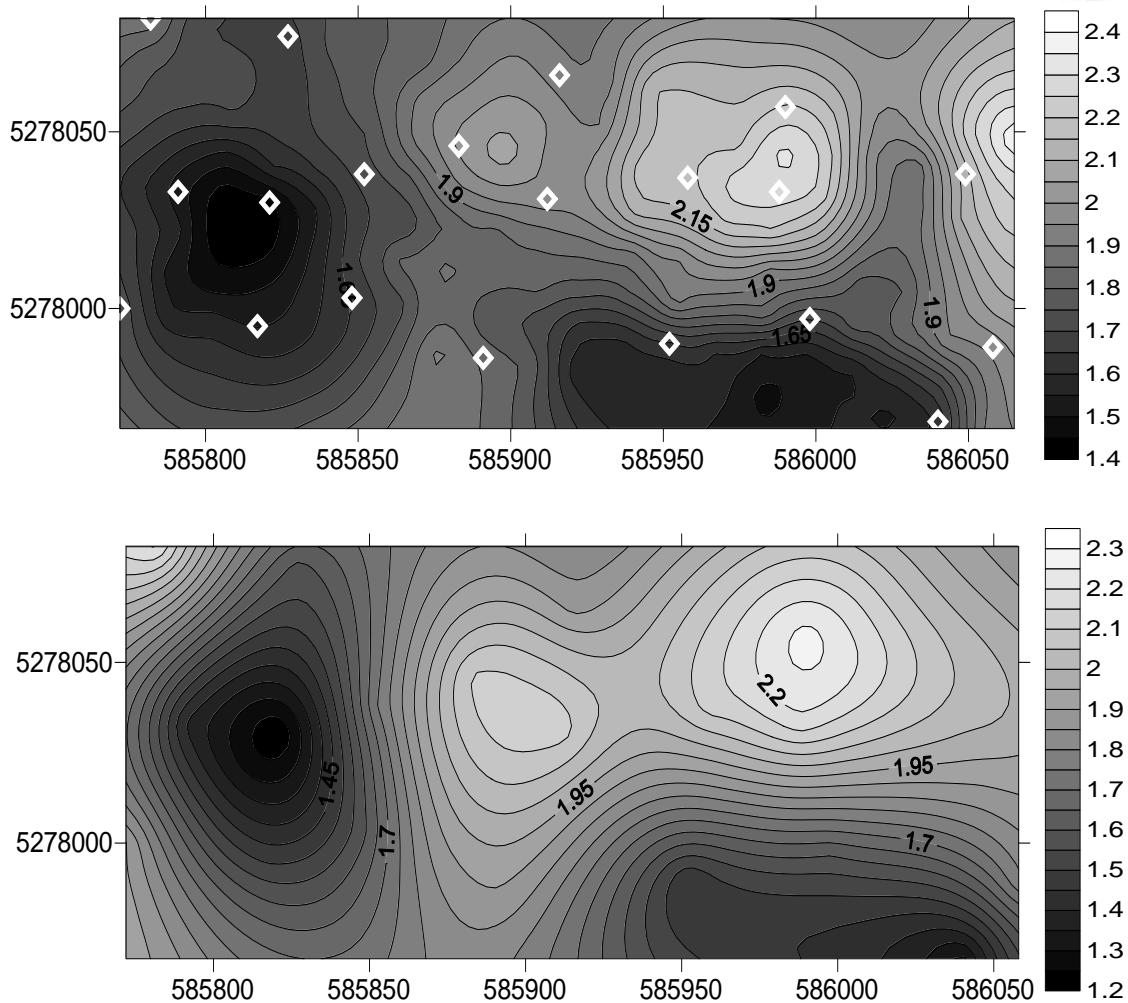


Рис. 1. Пространственная изменчивость электрической проводимости техноземов (ординарный кригинг). Вверху - на основании 160 измерений по 15-м регулярной сетке; внизу - на основании 20 измерений в точках, определенных по алгоритму SRSS.

Ромбы указывают расположение точек отбора 20 проб по алгоритму SRSS.

Далее нами будут построены карты изменчивости эдафических свойств техноземов по методу кригинга по 160 точкам отбора проб заложенных по регулярной сетке и по 20 точкам, определенным с помощью алгоритма SRSS.

В 160 точках были предсказаны значения электрической проводимости техноземов по пространственной модели, построенной методом кригинга по 20 и 160 точкам, после чего они были сравнены со значениями, непосредственно измеренными в этих точках. Коэффициент корреляции прогноза по 160 точкам с непосредственными измерениями составил  $r = 0,81$ ,  $p = 0,00$ , а по 20 точкам –  $r = 0,58$ ,  $p = 0,00$ . Корреляция между двумя способами прогноза равна  $r = 0,81$ ,  $p = 0,00$ . Таким образом, значительное снижение числа измерений электропроводности позволяет получить адекватную картину пространственного распределения признака.

Таблица 1

Статистические и геостатистические характеристики электропроводности  
рекультивируемых почв

Показатель	ЕС <sub>1</sub>	ЕС	Гуму	Гуму	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	pH	pH	Ka <sup>+</sup> +N	Ka <sup>+</sup> +N
	60	20	c <sub>160</sub>	c <sub>20</sub>	160	+ <sub>20</sub>	160	20	a <sub>160</sub>	a <sub>20</sub>
N	160	20	160	20	160	20	160	20	160	20
Среднее	1,8 3	1,7 9	0,77	0,71	0,0 14	0,01 4	7,5 1	7,4 9	0,035	0,035
Медиана	1,8 2	1,8 3	0,68	0,66	0,0 14	0,01 4	7,4 9	7,4 8	0,035	0,035
Ст. отклонение	0,3 5	0,3 5	0,23	0,22	0,0 03	0,00 3	0,1 9	0,1 3	0,004	0,004
CV, %	19, 13	19, 59	29,65	30,46	19, 72	20,5 2	2,5 6	1,7 2	10,72	10,06
C <sub>0</sub> (Наггет)	0,0 6	0,0 1	0,01	0,01	0,2 8	0,19	0,0 15	0,0 01	0,11	0,02
C <sub>1</sub> (Частичный порог)	0,0 7	0,1 3	0,03	0,05	0,5 1	0,99	0,0 21	0,0 19	0,04	0,12
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> (Порог)	0,1 3	0,1 4	0,04	0,06	0,7 8	1,19	0,0 36	0,0 20	0,15	0,14
SDL, %	46, 15	7,1 4	25,00	16,67	35, 29	16,3 3	41, 18	5,0 0	71,43	15,40
Радиус влияния, м	93	93	35	75	22	55	25	55	51,84	51,43

Примечание: SDL – уровень пространственной зависимости (*spatial dependence level*) ( $100 * C_0 / (C_0 + C_1)$ ); d – статистика Колмогорова-Смирнова; \* – 5 %-уровень значимости

Характер пространственной изменчивости электропроводности почвы указывает на особенности пространственной неоднородности других почвенных свойств, результатом которых является свойство почвы проводить электрический ток. Для оценки взаимосвязи электропроводности с эдафическими характеристиками был проведен многомерный факторный анализ (табл. 2).

Были выделены 4 фактора, собственные числа которых превышают 1. Факторные веса электропроводности для факторов 2–4 значительно превышают 0,3 (условную границу отсева факторных весов), что свидетельствует о сложном механизме формирования явления электропроводности техноземов в пределах изучаемого полигона. Переменные, связанные с фактором 1, в меньшей степени влияют на электропроводность. Речь идет об общей минерализации почвенного раствора (сухой остаток), обратной корреляции между концентрациями ионов кальция и магния, концентрации ионов хлора и сульфат-иона. Хорошим индикатором этого фактора как комплексной тенденции изменчивости химизма водной вытяжки является концентрация иона кальция.

Таблица 2





Факторный анализ изменчивости содержания гумуса, электрической проводимости и химизма водной вытяжки техноземов  
(представлены веса, превышающие 0,3 по модулю)

Показатели	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Гумус	–	–	–	0,93
pH	–	–0,93	–	–
Cl <sup>-</sup>	0,47	0,34	0,43	–
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,73	–	–	–
Ca <sup>2+</sup>	0,92	–	–	–
Mg <sup>2+</sup>	–0,82	–	–0,38	–
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	–	–0,96	–	–
Ka <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	0,32	–0,55	0,73	–
Сухой остаток	0,64	–0,66	–	–
ЕС	–	0,4	0,49	0,56
Объясненная дисперсия	2,87	2,89	2,10	1,36
Объясненная доля	0,26	0,26	0,19	0,12

Фактор 2, как упоминалось ранее, тесно связан с электропроводностью, описывает уровень минерализации почвенного раствора, связанного с концентрацией гидрокарбоната и одновалентных катионов. Индикатором этого фактора является pH водной вытяжки.

Фактор 3 описывает изменчивость концентрации ионов натрия и калия и иона хлора, которые отрицательно коррелируют с концентрацией двухвалентных ионов кальция и магния. Важную роль в изменчивости фактора 3 играет электропроводность техноземов.

Фактор 4 отражает изменчивость количества гумуса и корреляционную связь гумуса с электропроводностью техноземов.

Проведенный многомерный факторный анализ для дальнейшего изучения позволил остановиться на наиболее информативно важных эдафических показателях: концентрация иона кальция, pH водной вытяжки, сумма ионов калия и натрия в водной вытяжке, содержание гумуса.

Пространственная изменчивость концентрации иона кальция в водной вытяжке как индикатора изменчивости комплекса эдафических характеристик, описываемых фактором 1, представлена на рис 2.

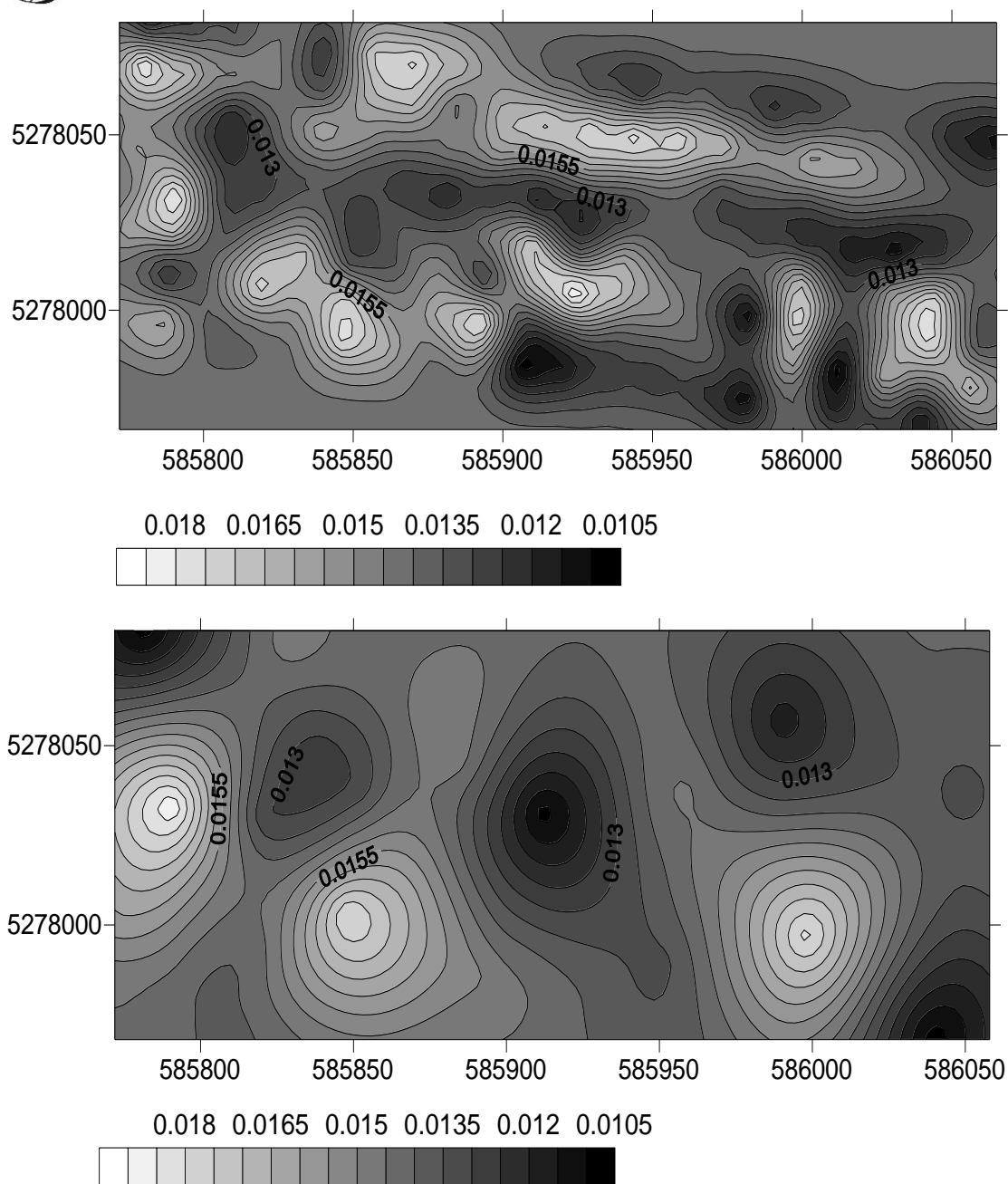


Рис. 2. Пространственная изменчивость содержания кальция в водной вытяжке в технозомах (ординарный кригинг). Вверху - на основании 160 измерений по 15-м регулярной сетке; внизу – на основании 20 измерений в точках, определенных по алгоритму SRSS.

Карта, построенная по 20 точкам отбора проб по алгоритму SRSS на основании данных по электропроводности почвы (карта внизу) только в общих чертах отображает особенности пространственной изменчивости концентрации ионов кальция в водной вытяжке, оцененной по регулярной сетке отбора проб из 160 измерений. Радиус

влияния полувариограммы, построенной на основании 160 измерений равен 22 м. При сборе данных по 20 точкам их среднее расстояние в пределах изучаемой территории не позволяет учесть уровень детализации, соизмеримый с расстоянием 22 м. Радиус влияния установленный по 20 точкам равен 55 м, и свидетельствует, что пространственная модель, построенная по 20 точкам не в состоянии учесть тонкие особенности пространственной изменчивости этого признака.

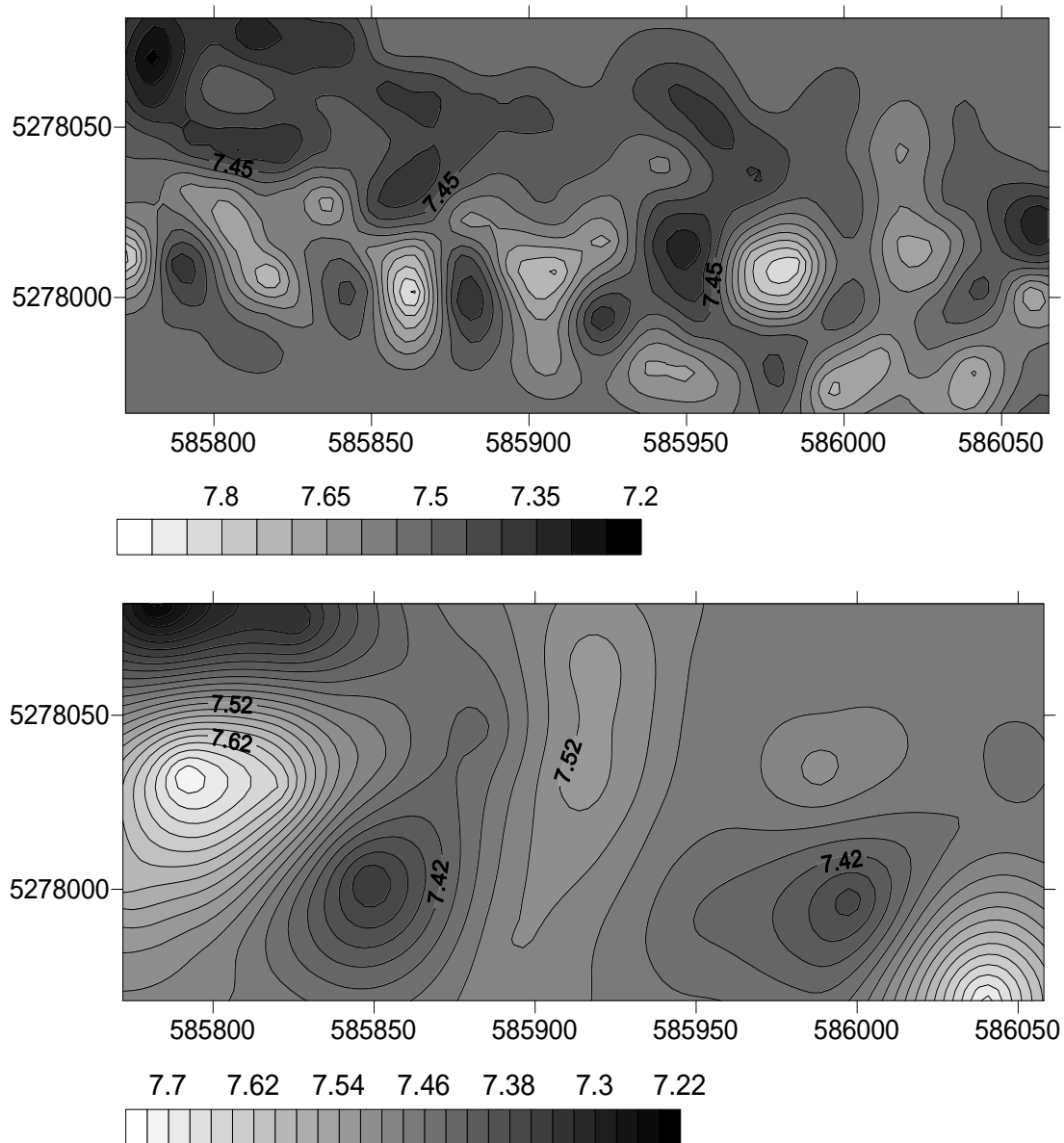


Рис. 3. Пространственная изменчивость рН водной вытяжки в технозомах (ординарный кригинг). Вверху - на основании 160 измерений по 15-м регулярной сетке; внизу – на основании 20 измерений в точках, определенных по алгоритму SRSS.

Однако следует отметить, что оценки статистических характеристик концентрации кальция в водной вытяжке техноземов близки как при большом объеме выборке (160 проб по регулярной сетке), так и при гораздо меньшем (20 проб по алгоритму). По непараметрическому тесту Манна-Уитни различия не достоверны ( $Z = 0,29, p = 0,78$ ).

Прогноз по 160 точкам сильно коррелирует с наблюдаемыми значениями ( $r = 0,86, p = 0,00$ ). Связь прогноза по 20 точкам с наблюдаемыми значениями гораздо ниже ( $r = 0,19, p = 0,02$ ). Прогнозы по 20 и 160 точкам отбора характеризуются умеренной степенью корреляции ( $r = 0,38, p = 0,00$ ).

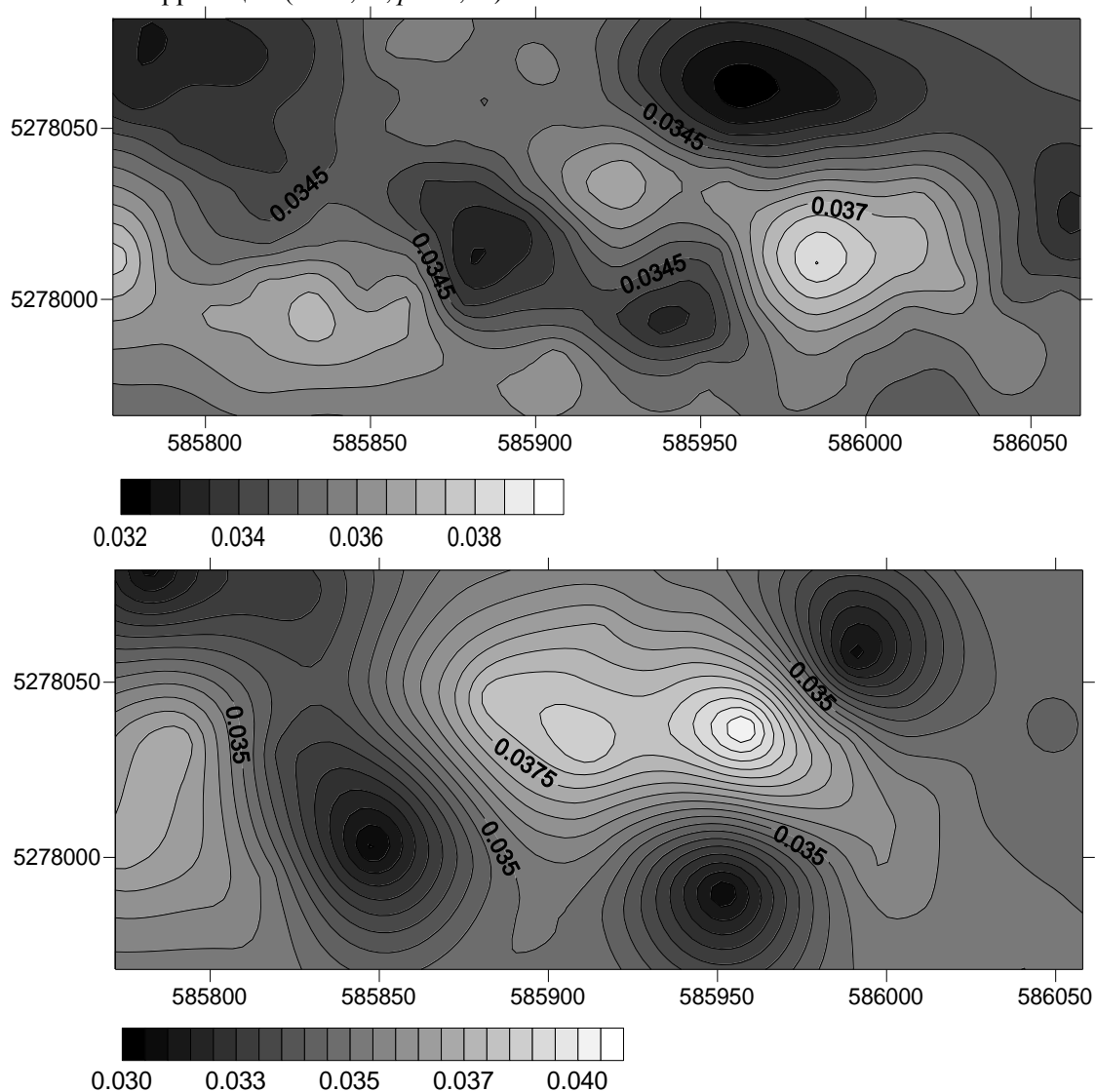


Рис. 4. Пространственная изменчивость содержания суммы калия и натрия в водной вытяжке в техноземах (ординарный кригинг). Вверху - на основании 160 измерений по 15-м регулярной сетке; внизу - на основании 20 измерений в точках, определенных по алгоритму SRSS.

Таким образом, организация сбора проб по алгоритму SRSS по данным электропроводности почв не позволяет получить удовлетворительное пространственное отображение изменчивости признаков, которые не коррелируют с электропроводностью. В нашем случае это концентрация кальция в водной вытяжке, а также концентрация ионов магния и сульфат-иона. Однако такая схема отбора проб позволяет получить интегральные статистические оценки параметров распределения, которые при малом объеме выборки достоверно не отличаются от оценок, полученных при большом объеме собранного материала (для магния тест Манна-Уитни  $Z = 0,15$ ,  $p = 0,88$ , для сульфат-иона –  $Z = 0,29$ ,  $p = 0,78$ ).

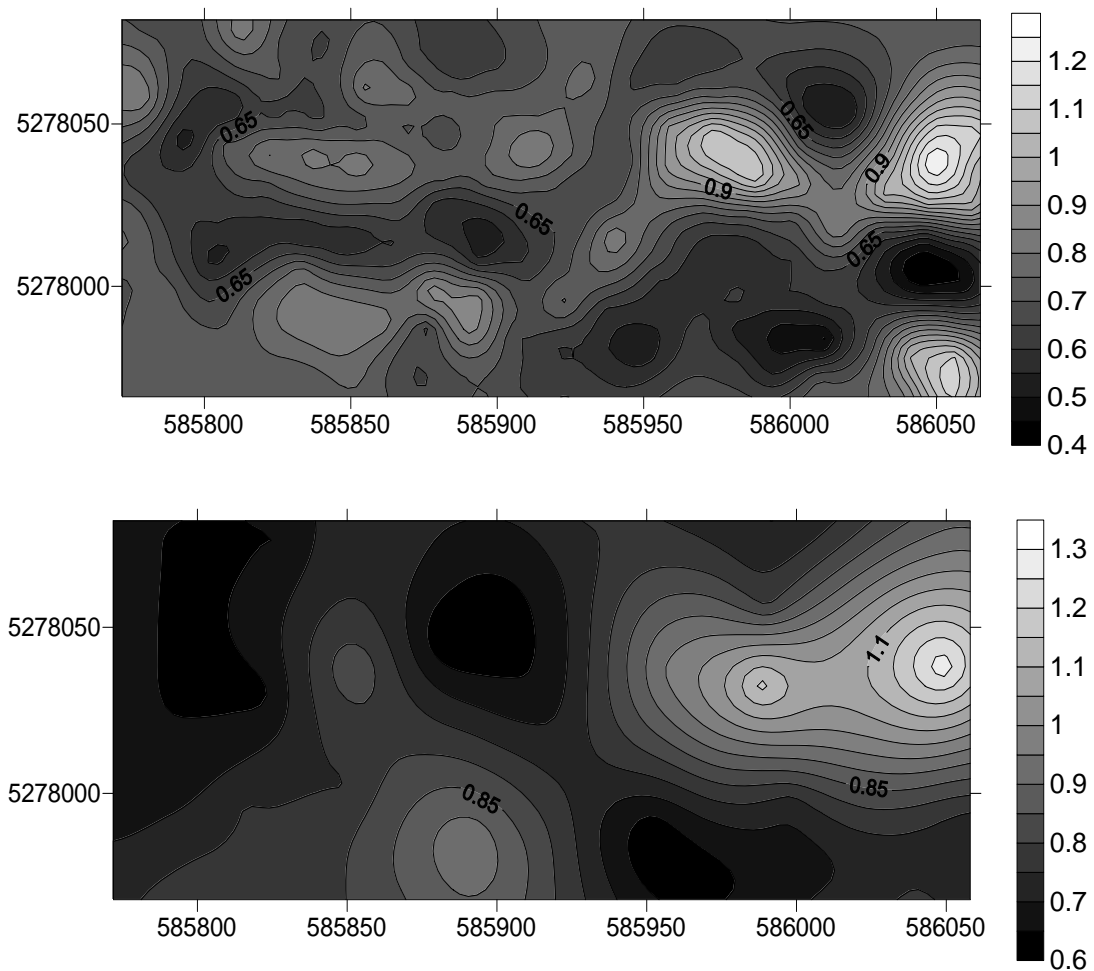


Рис. 5. Пространственная изменчивость содержания гумуса в техноземах (ординарный кригинг). Вверху - на основании 160 измерений по 15-м регулярной сетке; внизу – на основании 20 измерений в точках, определенных по алгоритму SRSS.

Индикатором фактора 2 является рН водной вытяжки, карта пространственной изменчивости которого представлена на рисунке 3. Оценки среднего значения рН почвенной вытяжки не различаются при двух объемах выборки ( $Z = 0,32$ ,  $p = 0,75$ ). Оценка радиуса влияния по полувариограмме, построенной на основании выборки 160 проб, составляет 25 м, что почти в два раза меньше, чем оценка, полученная по

выборке 20 проб. Это свидетельствует о том, что меньший объем проб закономерно не в состоянии отобразить тонкие особенности пространственной изменчивости признака. Прогноз значений признака, сделанный по модели кригинга на основании 160 проб коррелирует с наблюдаемыми значениями –  $r = 0,81$ ,  $p = 0,00$ , на основании 20 проб –  $r = 0,21$ ,  $p = 0,01$ . Корреляция между двумя способами прогноза равна  $r = 0,36$ ,  $p = 0,00$ .

Индикатором фактора 3 является сумма одновалентных ионов ( $\text{Ca}^+ + \text{Na}^+$ ) (рис. 4). Оценки средней концентрации  $\text{Ca}^+ + \text{Na}^+$  в почвенной вытяжке не различаются при двух объемах выборки ( $Z = 0,11$ ,  $p = 0,91$ ). Оценка радиуса влияния по полувариограмме, построенной на основании выборки 160 проб, составляет 51,84 м, что практически равно оценке, полученной по выборке 20 проб (51,43 м). Таким образом, для описания характера пространственной изменчивости концентрации одновалентных ионов вполне достаточно 20 проб в пределах изучаемой территории.

Прогноз значений признака, сделанный по модели кригинга на основании 160 проб коррелирует с наблюдаемыми значениями:  $r = 0,61$ ,  $p = 0,00$ . Корреляцию наблюдаемых данных с прогнозом на основании 20 проб нельзя признать достоверной ( $r = 0,14$ ,  $p = 0,07$ ). Корреляция между двумя способами прогноза равна  $r = 0,27$ ,  $p = 0,01$ .

Индикатором фактора 4 является количество гумуса в техноземах (рис. 5). Оценки среднего уровня гумуса не различаются при двух объемах выборки ( $Z = 1,19$ ,  $p = 0,24$ ). Оценка радиуса влияния по полувариограмме, построенной на основании выборки 160 проб, составляет 35 м, что в два раза меньше оценки, полученной по выборке 20 проб (75 м). Прогноз значений признака, сделанный по модели кригинга на основании 160 проб коррелирует с наблюдаемыми значениями:  $r = 0,83$ ,  $p = 0,00$ . Корреляция наблюдаемых данных с прогнозом на основании 20 проб также является достоверной ( $r = 0,23$ ,  $p = 0,00$ ). Кокригинг по 20 точкам с электропроводностью в качестве копеременной дает прогноз, который гораздо лучше коррелирует с исходными данными:  $r = 0,34$ ,  $p = 0,00$ . Корреляция между двумя способами прогноза равна  $r = 0,43$ ,  $p = 0,00$ .

Констатируем, что технология оптимального размещения точек отбора проб на основании измерения электрической проводимости является весьма результативной. Использование эдафической характеристики, измерение которой можно сделать в большом числе, для определения размещения меньшего числа точек отбора более трудоемких проб, дает возможность наиболее точного отображения пространственной структуры важных эдафических свойств. Пространственная картина изменчивости ключевых характеристик почвенного покрова, которые непосредственно определяют продуктивность земель, позволяет осуществить выделение ряда единиц управления в пределах поля, в рамках которых оправдано применять дифференцированную систему агротехнических мероприятий, что является ключевым моментом технологии точного земледелия.

Использование большего объема данных по электропроводности в качестве копеременной при кокригинге улучшает качество пространственных моделей для эдафических показателей, большое число которых получить затруднительно.





## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Corwin, D. L. & Lesch, S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture – theory, principles, and guidelines. *Agron. J.*, 95(3), 455-471.
- Corwin, D. L., Kaffka, S. R., Hopmans, J.W., Mori, Y., Lesch, S. M., & Oster, J. D. (2003). Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma*, 114(3–4), 231–259.
- Corwin, D.L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.*, 46, 11–43.
- Francis, D.D., Schepers, J.S., & Stafford, J.V. (Ed.). (1997). Selective soil sampling for site-soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and specific nutrient management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 119–126.
- Johnson, C.K., Doran, J.W., Duke, H.R., Weinhold, B.J., Eskridge, K.M., & Shanahan, J.F. (2001). Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1829–1837.
- Johnson, C.K., Mortensen, D.A., Wienhold, B.J., Shanahan, J.F., & Doran J.W. (2003). Site-specific management zones based upon soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. *Agron. J.*, 95, 303–315.
- Lark, R. M., & Stafford, J.V. (Ed.). (1997, Sept.). *Variation in soil conditions and crop performance to detect the spatial variability of the salt and clay contents*. Precision agriculture—'97. Proc. Eur. Conf. on Precision Agriculture, 1<sup>st</sup> Warwick University Conference Centre, Oxford.
- Родин, Л. Е., Ремезов, Н. П., Базилевич, Н. И. (1968). *Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах*. Ленинград.

Шемавнев, В. И., Гордиенко, Н. А., Дырда, В. И., Забалуев, В. О. (2005). *Устойчивое развитие сложных экотехносистем*. Москва, Днепропетровск.

#### REFERENCES

- Corwin, D.L., & Lesch, S.M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture – theory, principles, and guidelines. *Agron. J.*, 95(3), 455-471.
- Corwin, D.L., Kaffka, S.R., Hopmans, J.W., Mori, Y., Lesch, S.M., & Oster, J.D. (2003). Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma*, 114(3-4), 231-259.
- Corwin, D.L., & Lesch, S.M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.*, 46, 11-43.
- Francis, D.D., Schepers, J.S., & Stafford, J.V. (Ed.). (1997). Selective soil sampling for site-soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and specific nutrient management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 119-126.
- Johnson, C.K., Doran, J.W., Duke, H.R., Weinhold, B.J., Eskridge, K.M., & Shanahan, J.F. (2001). Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1829-1837.
- Johnson, C.K., Mortensen, D.A., Wienhold, B.J., Shanahan, J.F., & Doran J.W. (2003). Site-specific management zones based upon soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. *Agron. J.*, 95, 303-315.
- Lark, R. M., & Stafford, J.V. (Ed.). (1997, Sept.). *Variation in soil conditions and crop performance to detect the spatial variability of the salt and clay contents*. Precision agriculture—'97. Proc. Eur. Conf. on Precision Agriculture, 1<sup>st</sup> Warwick University Conference Centre, Oxford.



---

Rodin, L.Ye., Remezov, N.P., & Bazilevich, N.I. (1968). *Manual for study of dynamic and biological turnover in phytocoenosis*. Leningrad. [in Russian]

Shemavnev, V.I., Gordienko, N.A., Dyrda, V.I., & Zabaluev, V.O. (2005). *Sustainable development of complex ecological-technological systems*. Moscow-Dnepropetrovsk.

© А. В. Жуков, Г. А. Задорожная, Е. В. Андрусевич, 2012  
© A. V. Zhukov, G.A. Zadorozhnaia, E. V. Andrusevich, 2012

Надійшла до редколегії 25.01.2012