

Геостатистика в сельскохозяйственной науке с учётом глобального изменения климата при стратегии планирования агротехнологических решений

Ю. Г. Захарян, Ю. Г. Янко

*Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: dzhem.m@yandex.ru, yancko@agrophys.ru*

Показано, что аналитическая аппроксимация вариограмм эффективности, стратегии планирования агротехнологических решений к пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных территорий, а следовательно, и целесообразность применений точной агротехнологии в каждом конкретном случае зависит от почвенно-климатической вариабельности. Следует отметить, что существует достаточно большое количество прикладных геостатистических программ, позволяющих распределять агрометеорологические данные по двух- и трёхмерным полям, выделять тренды и подбирать соответствующие приближённые зависимости обеспечивающихся задач через компьютеризацию с учётом вариограммного анализа. По геоинфраструктуре в рамках обсуждаемой методологии показан и проиллюстрирован тот факт, что природные и антропогенные катастрофы сказываются на нашей живой планете, а также на стратегии планируемых адаптаций технологических воздействий. Уменьшение рисков в сельском хозяйстве при глобальных изменениях климата может быть достигнуто проведением целесообразных агротехнологических воздействий с учётом варьирующих пространственно-временных явлений и прогнозом процессов его трансформации. Рассмотрены задачи выбора применения оптимальных дифференцированных агротехнологических решений и интервала времени проведения мероприятия. Решение статистической задачи рационального выбора вероятностных распределений продуктивности урожаев сельскохозяйственной культуры предполагает возможность использования детализированной геостатистической информации об эффективности при различных погодных явлениях, на различных типах почв и для различных мелиоративных технологических воздействий.

Ключевые слова: вариограммный анализ, стратегия планирования, пространственно-временной, моделирование, геостатистика, дифференцированная агротехнология, мелиорация

Одобрена к печати: 26.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78

Введение

Геостатистический анализ и подход к нему состоят в том, что при выполнении гипотезы стационарности второго порядка статистическая структура сельскохозяйственного поля пространственно-распределённого фактора может быть описана (оценена) с помощью так называемой вариограммной функции $\gamma(\vec{h})$, которая определяется как половина среднего в статистическом содержании квадрата разности величины фактора в точках на расстоянии h между двумя пунктами (от поля к полю или региона к региону). В таких исследованиях расстояния называют лагом или рангом вариограммной функции (Захарян, 2018).

Соответственно:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2} E [f(\vec{r} + \vec{h}) - f(\vec{r})]^2,$$

где E — операция осреднения; \vec{r} — пространственные координаты, которые показывают, что для стационарных полей вариограммная функция зависит только от фактора расстояния между точками.

Космические исследования (Космические..., 1976) показали, что приблизительно 50 % земной поверхности подверглись изменениям в результате антропогенного воздействия, что крайне негативно сказывается на биологическом разнообразии и климате планеты.

Для частичной компенсации климатических и антропогенных катастроф в сельскохозяйственной науке необходима адаптация технологических приёмов и исследований, принятие соответствующих агротехнологических решений, оптимизация операций, обследование мелиоративных систем дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ) из космоса, т. е. применение научного знания для решения практических задач в области мелиорации (Дубенок и др., 2019) в агропромышленном комплексе (АПК), а также в различных областях, например в облачных вычислениях (*англ.* cloud computing).

Пространственно-временные, погодно-климатические явления, такие как увеличение частоты ливней и ураганов, наводнения и извержение вулканов, всё чаще ставят под угрозу сельское хозяйство и городскую инфраструктуру. Из приведённых исследований можно заключить, что для практических целей большое значение имеют космические данные дистанционного зондирования о климатических условиях ближайших 50 лет при естественном изменении климата.

Вопрос об антропогенном механизме естественных изменений климата за периоды времени в несколько десятилетий исследований показывает, что эти изменения в основном зависят от колебаний количества аэрозоля в нижней стратосфере, т. е. носят физический характер (человеческий фактор). Эти колебания имеют значительное влияние на массу стратосферного аэрозоля и воздействуют на вулканические извержения, а уровень активности неуправляемых колебаний — на почвенно-климатические опасные явления.

Научные исследования показывают, что в значительной мере колебания вулканической активности привели к повышению средней глобальной температуры примерно на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Lamb, Woodroffe, 1970). Вулканическая деятельность в 20–30-х гг. нашего века станет довольно частой аномалией в режиме вулканической активности последних столетий (например, извержение влк. Кумбре-Вьеха, о-в Ла Пальма, Канарские о-ва, Испания, 2021 г.).

Количественный анализ данных из сводки вулканической активности и материалов о вековом ходе средней глобальной температуры позволяет прийти к выводу, что вероятное изменение средней за десятилетие глобальной температуры к концу нашего века под влиянием колебаний вулканической активности составит $0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальное изменение этой температуры — несколько десятых градуса.

Антропогенная деятельность в последние 70 лет также сильно повлияла на глобальное изменение климата и стратегии целесообразности планируемых технологических воздействий. Антропогенные изменения состава атмосферы в XXI в. оказывают всё более возрастающее влияние на климат и рост концентрации углекислого газа в атмосфере, обусловленный сжиганием угля, нефти и других видов ископаемого топлива земного шара, а также уменьшением количества углерода в продуктах с учётом варьирующих почвенно-климатических факторов.

Например, отчёт Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) содержит более 100 Пбайт данных, а такой же отчёт Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США (НАСА, *англ.* National Aeronautics and Space Administration — NASA) по поводу климатических данных с учётом вариабельности и метеорологических факторов к 2030 г. будет иметь объём уже более 300 Пбайт.

Современные научные исследования показывают, что спутниковые данные ДЗЗ в настоящее время дают возможность целесообразно планировать стратегии адаптации агротехнологических решений в пространственно-временном континууме ($D \times T$) для использования информационного обеспечения в АПК с учётом глобального изменения климата (Комаров и др., 2021).

Для оценки перспективности сельскохозяйственных земель множественные неоднородные параметры могут быть применимы в геостатистическом анализе для использования пространственной дифференциации стратегии планирования технологических решений спутникового мониторинга, направленных на выполнение прикладных задач планирования технологических и мелиоративных решений в технологии точного земледелия (ТЗ).

Цель данного исследования заключается в создании методических основ и алгоритмов на основе геостатистического анализа для получения эмпирических оценок с помощью варио-

граммной функции $\gamma(\vec{h})$ с учётом уменьшения рисков изменения климата на стратегии планируемых технологических воздействий в сельскохозяйственной практике.

В соответствии с этим были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка принципов и алгоритмов построения оптимальных недифференцированных стратегий хозяйственного планирования, учитывающих пространственно-временную геостатистику (закон распределения) агрометеорологической неоднородности территории.
2. Разработка комплекса математических моделей и алгоритмов для оценки потенциальной эффективности пространственной дифференциации агротехнических решений, детализируемых в соответствии с агрометеорологической вариабельностью территории.
3. Создание теоретических и методических основ для разработки агротехнологических решений на неоднородных по агроклиматическим показателям сельскохозяйственных территориях, таких как степень пространственной детализации принимаемых решений и характер используемой при их реализации геостатистической информации.

Методы исследования

В основе работы лежит анализ эмпирико-статистических моделей, которые в количественной форме выражают связь между варьирующим по территории почвенно-климатическим фактором и адаптацией технологических воздействий при управлении агрометеорологическими рисками, с одной стороны, и урожайностью или определённым хозяйственно-экономическим эффектом (выигрышем или потерями), получаемым при выбранной стратегии планирования агротехнических мероприятий, — с другой. В качестве основного математического аппарата в исследовании используется теория вероятностей и применяются идеи теории геостатистических решений (Isaaks, Srivastava, 1989). Спутниковый мониторинг (Лупян и др., 2020) осуществлялся с использованием LandViewer (<https://cos.com>) — сервиса обработки и анализа изображений в режиме реального времени, которому удастся объединить огромный список аналитических инструментов, включая построение вариограммной функции.

В работе были применены методика нахождения эффективных стратегий хозяйственного планирования с учётом геостатистических адаптаций и характеристик агрометеорологической неоднородности сельскохозяйственных земель и комплекс математических моделей и алгоритмов, позволяющих оценивать потенциальную эффективность пространственной дифференциации агротехнических воздействий.

Результаты исследований

Решаемая проблема в исследовании глобальной изменчивости климата и, соответственно, целесообразное планирование технологических приёмов — это технологии облачных вычислений, которые сводятся к следующим пунктам:

- большой объём климатических данных наблюдений и моделирования, хранящихся в распределённой сфере, которая обеспечивается облачной платформой;
- проблема разнообразия климатических данных, которые рассматриваются с использованием пространственно-временного индекса, чтобы объединить эти данные с аспектами пространства времени.

При рассмотрении вопросов геопространственной дифференциации решений на неоднородной сельскохозяйственной территории до сих пор принималась во внимание только естественная, т. е. природно-обусловленная неоднородность, не считая микромасштабной изменчивости почвы (вариабельность, случайный шум), и также человеческий фактор, влияющий на стратегии планирования адаптации технологических воздействий и агропродуктивность.

При этом любая целесообразная дифференциация технологии по крайней мере теоретически оказывалась экономически выгодной, и тем в большей степени, чем детальнее учитывается пестрота территории.

В вариограммном анализе так называемая микрокомпонента $\varepsilon = \varepsilon(r)$ характеризует случайную вариабельность исследуемого фактора F , которая порождается соответствующей микромасштабной изменчивостью структурных физико-механических и химических свойств почвы, а также случайными ошибками измерений (Якушев, 2016), т. е. имеем трёхкомпонентную модель.

На практике, разумеется, всегда приходится иметь дело не с отдельными компонентами, а с суммарной неоднородностью, которая и должна учитываться при обосновании целесообразного планирования адаптации агротехнологических стратегий и решений.

Аналитический метод исследования и анализ по микрокомпоненте $\varepsilon(r)$ предлагается интерпретировать как пространственно некоррелированный случайный шум с нулевым средним и неизменной в пределах территории конечной дисперсией, известной в геостатистике как наггет-дисперсия. Дисперсия — это мера разброса реализации случайного процесса относительно его математического ожидания (Kanevsky et al., 1996). Геостатистическая связь между микрокомпонентой $\varepsilon(r)$ и случайной компонентой $s(r)$ отсутствует, т. е. нет эффективной оценки перспективности перехода от ориентации на средние условия варьирующего агрометеорологического фактора к стратегии адаптации технологий точного земледелия на основании анализа наггет-дисперсии.

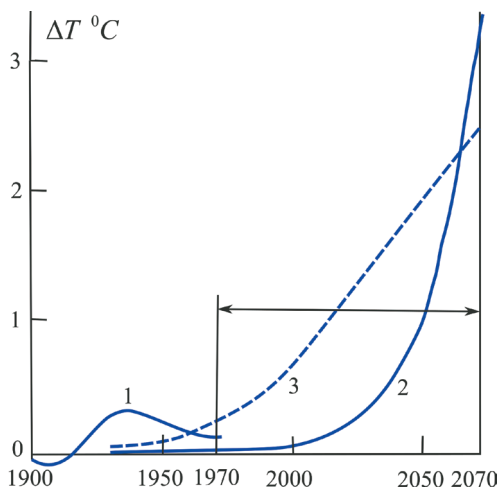
Анализ подобных «идеальных» моделей (Matheron, 1971; Webster, Oliver, 2007) важен с той точки зрения, что он позволяет установить потенциальные выгоды целесообразного дифференцированного планирования технологических решений, а также количественно и качественно оценить ту максимальную пользу, которая может быть получена за счёт рационального использования территориально детализированной природной и антропогенной катастрофы с учётом геопространственной информации ДЗЗ.

Другое обстоятельство, которое также является результатом нашего исследования, состоит в ограниченных возможностях точного регулирования технологических режимов и невозможности регулирования природно-антропогенных катастроф и их неуправляемых колебаний.

Пространственная изменчивость условий формирования урожая по рассматриваемому фактору X будет, как очевидно, представлять собой результат сложения двух составляющих: естественного варьирования X по территории поля и неуправляемых колебаний интенсивности агротехнического воздействия, происходящих от точки к точке.

Как следует из уже сказанного, фактическая интенсивность агротехнического воздействия в произвольной точке (ξ, η) рассматриваемой сельскохозяйственной территории может быть представлена в виде суммы:

$$\tilde{d}(\xi, \eta) = d(\xi, \eta) + \delta_d(\xi, \eta),$$



где $d(\xi, \eta)$ — расчётное (желаемое) значение интенсивности в этой точке, а $\delta_d(\xi, \eta)$ — погрешность человеческого фактора с учётом прогноза ожидаемого изменения средней температуры воздуха вследствие роста производства энергии (из земного шельфа — нефть, газ, уголь и т. д.).

Прогноз ожидаемого изменения средней температуры воздуха у земной поверхности (1972). 1 — вековой ход средней температуры; 2 — изменение температуры, обусловленное ростом производства энергии; 3 — изменение температуры, обусловленное ростом концентрации углекислого газа

Остановимся подробнее на слагаемом $\delta_d(\xi, \eta)$, с которым связано существование антропогенной неоднородности почвенно-климатических явлений (рисунок, см. с. 73).

На рисунке представлен прогноз ожидаемого изменения средней температуры воздуха у земной поверхности под влиянием антропогенных факторов, данный в начале 1970-х гг.

Как видно из графика, предполагалось, что в первой половине XXI в. основное влияние на изменение климата окажет рост концентрации CO_2 , который приведёт к потеплению, достигающему в середине XXI в. $2,5^\circ\text{C}$, если не будет предприниматься частичная компенсация опасных почвенно-климатических явлений. Кривые 2, 3 показывают, что во второй половине XXI в. потепление может усилиться в результате общего роста производства энергии, увеличивающей приход тепла к поверхности Земли. Предполагается, что при развитии потепления уменьшатся меридиональные градиенты температуры и в связи с этим ухудшится режим увлажнения на континентах в средних широтах.

Для описания этой компоненты могут быть предложены различные детерминированные и статистические модели. Простейшее допущение состоит в том, что $\delta_d(\xi, \eta)$ — не зависящая от X , меняющаяся от точки к точке случайная величина, влияющая на агропродуктивность, с нулевым средним значением ($\bar{\delta}_d = 0$) и дисперсией σ_δ^2 (среднее квадратическое отклонение, мера разброса).

Более сложная модель предусматривает включение в $\delta_d(\xi, \eta)$ наряду со случайной ещё и некоторой постоянной составляющей $\bar{\delta}_d$, которая играет роль систематической ошибки реализации расчётного технологического режима с учётом математического анализа. На основе такого анализа рассматриваются микромасштабные вариации почвенно-климатических показателей варьирующих агрометеорологических факторов от точки к точке.

Перспективным направлением исследования сельскохозяйственных территорий для стратегии планирования технологических воздействий служит геостатистическая модель аппроксимации эмпирических вариограмм, удовлетворяющая условию стационарности второго порядка.

Оценка анализа и моделирования пространственно-распределённых данных с применением целесообразной дифференциации с учётом научного метода приближения вариограмм указанного поля при использовании сферической модели показала, что это принципиально для дифференцированного планирования агротехнологии. Перейдём от абсолютных значений вариограммы $\gamma(h)$ к нормированной полудисперсии:

$$v(\mu) = \begin{cases} 0 & \text{при } h = 0, \\ \xi + (1 - \xi)T(\mu) & \text{при } 0 < \mu < 1, \\ 1 & \text{при } \mu \geq 1, \end{cases} \quad (1)$$

где ξ — относительная наггет-дисперсия, уровень различия на нулевом расстоянии, т. е. отсутствие пространственной корреляции с учётом меры разброса при реализации случайных процессов относительно его математического ожидания σ_x^2 , характеризующий вариабельность этих переменных на множестве наблюдений; $\mu = \eta/a$ — расстояние, выраженное в единицах лага a ; $T(\mu)$ — полиномиальная функция, определяемая равенством:

$$T(\mu) = \frac{3}{2}\mu - \frac{1}{2}\mu^3,$$

μ как безразмерная величина в дальнейшем будет использоваться в качестве характеристики относительных размеров сельскохозяйственного поля с учётом глобального изменения климата.

В соответствии с этим μ можно определить как масштаб поля (или относительный масштаб); при $\mu = 1$ характерные размеры поля имеют порядок лага и совпадают с интервалом затухания пространственных корреляционных связей.

Геостатистику как перспективную направленность в сельскохозяйственной науке можно использовать и для точного земледелия, изучающего теорию и способы построения особых чертежей, называемых номограммами, с помощью которых можно получать решения уравнений, не проводя вычислений.

Для любых безразмерных величин ξ и μ в диапазоне $[0, 1]$ не сложно определить отвечающие им значения нормированной вариограммной функции относительного наггета и относительного масштаба поля (1).

Для нормированной вариограммы допускается установить другой важный показатель в следующем отношении:

$$v = (\mu, \xi), \quad \xi = \frac{c_0}{c} = \frac{c_0}{c_0 + c_1},$$

где c_0 и c_1 со смыслом модельных параметров во всех случаях характеризуют долю наггет-дисперсии в общей дисперсии пространственно-временной неоднородности характеристик сельскохозяйственного поля.

Следует отметить содержательное различие между вышеуказанными показателями ξ и θ : первый определяет долю микрокомпоненты в общей дисперсии варьирования рассматриваемого почвенного или иного фактора на достаточно большой территории, когда $\mu \geq 1$ и $v = 1$, второй характеризует долю микроизменчивости и вариации того же фактора на площади ограниченного размера, где корреляционные связи ещё не стремятся к затуханию, т.е. при $\mu < 1$ и $v < 1$:

$$\theta = \frac{c_0}{\gamma(h)} = \frac{\xi}{v(\mu)},$$

где $\gamma(h)$ — вариограммная функция, $v = (\mu, \xi)$.

Учитывая значения величины θ , можно сделать некоторые общие выводы о закономерностях поведения данного показателя. На незначительных по размеру опытных участках и небольших сельскохозяйственных территориях коррелированная мезокомпонента пространственной неоднородности выражена достаточно слабо, и вся изменчивость в основном сосредоточена в случайных (пространственно некоррелированных) микроколебаниях варьирующихся факторов. При $v(\mu) \rightarrow 1$ значение θ приближается к предельно низкому уровню, равному ξ .

Пример расчёта результатов полевого опыта на полигонах ЗАО «Мельниково», ЗАО «Осьминское», ЗАО «Культура-Агро» по ТЗ с учётом стратегии адаптации целесообразного планирования агротехнологии (Захарян, Комаров, 2019) иллюстрирует использование геостатистики и вариограммного анализа в качестве инструмента количественного описания статистических закономерностей пространственного варьирования различных почвенных показателей и показателей урожайности.

Оценочные действия и использование геостатистики в агрономической науке в плане перспективности сельскохозяйственной территории при применении стратегии адаптации агротехнологических решений в системе ТЗ (Zhang, 2015) сводятся к следующим принципиальным этапам:

- определение показателей μ и θ как значений нормированной вариограммы $v = v(\mu, \theta)$ и величины $\theta = \theta(\mu, \xi)$. Оценки относятся к сферической модели, аналогичные оценки могут быть получены и для других аппроксимаций;
- анализ выделения из исходных данных трендовой составляющей, т.е. макрокомпоненты, с последующим расчётом эмпирической вариограммы поля отклонений от тренда, что является главным фактором и отражает пространственную изменчивость конкретного почвенно-климатического показателя.

Выводы

Проведённым геостатистическим анализом принципиально установлено, что неуправляемые колебания технологического воздействия человека и природных явлений от региона к региону оказывают серьёзное влияние на эффективность проводимых хозяйственных мероприятий и агропродуктивность сельскохозяйственных территорий с применением ДЗЗ с учётом глобального изменения климата.

Дана общая формулировка проблемы учёта антропогенно-природной и почвенно-климатической неоднородности территории, которая неизбежно создаётся из-за погрешностей реализации расчётных технологических воздействий с использованием геостатистического анализа планирования адаптации решений в агропромышленном комплексе и в целом во всех сферах экономики.

Многочисленные исследования по геоинфраструктуре в рамках обсуждаемой методологии показали и иллюстрировали тот факт, что природные и антропогенные катастрофы сказываются на нашей живой планете и на стратегии планируемых адаптаций агротехнологических решений к пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных территорий с учётом ДЗЗ.

Несложно понять, что для больших масштабов полей, в пределах которых пространственные корреляционные связи изменяющегося показателя полностью затухают (при $\nu = 1$), целесообразность или нецелесообразность использования частично дифференцированной стратегии агротехнологии определяется только на основании значения ν , т. е. исключительно посредством анализа наггет-дисперсии.

Литература

1. Дубенок Н. Н., Янко Ю. Г., Петрушин А. Ф., Калинин Р. В. Перспективы использования данных дистанционного зондирования в оценке состояния мелиоративных систем и эффективности использования мелиорированных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 96–104. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104.
2. Захарян Ю. Г. Оценка эффективности адаптации агротехнологических решений к пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных земель: дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2018. 272 с.
3. Захарян Ю. Г., Комаров А. А. Перспективы использования геостатистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 140–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148.
4. Комаров А. А., Захарян Ю. Г., Ирмулатов Б. Р. Оценка и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей в условиях акмолинского региона Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 182–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191.
5. Космические исследования земных ресурсов. Методы и средства измерения и обработки информации. М.: Наука, 1976. 386 с.
6. Лупян Е. А., Денисов П. В., Середа И. И., Трошко К. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Наблюдение развития озимых культур в южных регионах России весной 2020 г. на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 285–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-285-291.
7. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
8. Isaak E. H., Srivastava R. M. Applied Geostatistics. N. Y.: Oxford University Press, 1989. 561 p.
9. Kanevsky M., Arutyunyan R., Bolshov L., Demyanov V., Maignan M. Artificial neural network and spatial estimation of Chernobl fallout // Geoinformatics. 1996. V. 7. No. 1–2. P. 5–11. DOI: 10.6010/geoinformatics1990.7.1-2_5.
10. Lamb H. H., Woodroffe A. Atmospheric circulation during the last ice age // Quaternary Research. 1970. V. 1. No. 1. P. 29–58. DOI: 10.1016/0033-5894(70)90010-4.
11. Matheron G. The theory of regionalized variable and it applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1971. No. 5. 211 p.
12. Webster R., Oliver M. A. Geostatistics for Environmental Scientists. 2nd ed. Chichester, UK: John Willey and Sons, 2007. 336 p.
13. Zhang Q. Precision agriculture technology for crop farming. USA: CRC, 2015. 360 p.

Geostatistics in agricultural science taking into account global climate change in the strategy of regulating agrotechnological solutions

Yu. G. Zakharyan, Yu. G. Yanko

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: *dzhem.m@yandex.ru, yanko@agrophys.ru*

The paper shows that the analytical approximation of efficiency variograms, planning strategies for agrotechnological solutions to the spatial and temporal heterogeneity of agricultural areas, and, consequently, the feasibility of applying precise agricultural technology in each specific case depends on soil and climate variability. It should be noted that there are a fairly large number of applied agrostistical programs that allow distributing agrometeorological data over two- and three-dimensional fields, identifying trends and selecting the appropriate approximate dependencies of the tasks provided through computerization taking into account variogram analysis. For geoinfrastructure, within the framework of the discussed methodology, the fact is shown and illustrated that natural and man-made disasters affect our living planet in the same way as the strategy of planned adaptations of technological impacts. Reduction of risks in agriculture under global climate change can be achieved by appropriate agrotechnological efforts taking into account varying spatio-temporal phenomena and forecasting the processes of its transformation. The paper considers the tasks of choosing the application of optimal differentiated agrotechnological solutions and the time interval for the event. The solution of the statistical problem of the rational choice of probabilistic distributions of the productivity of agricultural crops suggests the possibility of using detailed geostatistical information on efficiency under various weather phenomena, on various types of soils and for various ameliorative technological impacts.

Keywords: variogram analysis, planning strategy, spatiotemporal distribution, geostatistics, differentiated agricultural technology, melioration

Accepted: 26.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78

References

1. Dubenok N. N., Yanko Yu. G., Petrushin A. F., Kalinichenko R. V., Remote sensing data in land-reclamation system and reclaimed land management assessment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 96–104 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104.
2. Zakharyan Yu. G., *Otsenka effektivnosti adaptatsii agrotekhnologicheskikh reshenii k prostranstvenno-vremennoi neodnorodnosti sel'skokhozyaistvennykh zemel'*: Diss. dokt. s.-kh. nauk (Assessment of the effectiveness of adaptation of agro-technological solution to spatial and temporal heterogeneity of agricultural land, Dr. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: ARI, 2018, 272 p. (in Russian).
3. Zakharyan Yu. G., Komarov A. A., Prospect for geostatistic application for analyzing plant state on the basis of remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 140–148 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148.
4. Komarov A. A., Zakharyan Yu. G., Irmulatov B. R., Evaluation and analytical approximation of variogram for agricultural field in the condition of the Akmolinsky Region of Kazakhstan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 182–191 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191.
5. *Kosmicheskie issledovaniya zemnykh resursov. Metody i sredstva izmereniya i obrabotki informatsii* (Space Studie of Earth Resources. Method and tool for measuring and processing information), Moscow: Nauka, 1976, 386 p. (in Russian).
6. Loupian E. A., Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Analysis of winter crop development in the southern region of Russia in spring 2020 based on remote monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 285–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-285-291.
7. Yakushev V. V., *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika* (Precision agriculture: theory and practice), Saint Petersburg: Agrophysical Research Institute, 2016, 364 p. (in Russian).

8. Isaak E. H., Srivastava R. M., *Applied Geostatistics*, New York: Oxford University Press, 1989, 561 p.
9. Kanevsky M., Arutyunyan R., Bolshov L., Demyanov V., Maignan M., Artificial neural network and spatial estimation of Chernobyl fallout, *Geoinformatics*, 1996, Vol. 7, No. 1-2, pp. 5–11, DOI: 10.6010/geoinformatics1990.7.1-2_5.
10. Lamb H. H., Woodroffe A., Atmospheric circulation during the last ice age, *Quaternary Research*, 1970, Vol. 1, No. 1, pp. 29–58, DOI: 10.1016/0033-5894(70)90010-4.
11. Matheron G., *The theory of regionalized variable and applications*, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1971, No. 5, 211 p.
12. Webster R., Oliver M. A., *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd ed., Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2007, 336 p.
13. Zhang Q., *Precision agriculture technology for crop farming*, USA: CRC, 2015, 360 p.