

## Оценка дифференциации агротехнологий по трём градациям с учётом глобального изменения климата

Ю. Г. Захарян, А. А. Комаров, Ю. Г. Янко

*Агрофизический научно-исследовательский институт  
Санкт-Петербург, 195220, Россия*

*E-mails: dzhem.m@yandex.ru, zelenydar@mail.ru, yanko@agrophys.ru*

На основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и сопряжённых наземных исследований, которые проводились в 2018–2022 гг., представлены результаты исследования дифференциации агротехнологических решений по трём градациям. Исследования выполнялись в разных агроклиматических зонах: в Ленинградской обл. на полигонах точного земледелия, в Краснодарском крае, а также в природных условиях Северного Казахстана. На полигонах точного земледелия проводилось детальное изучение пространственно-временной неоднородности состояния почвенного покрова по основным агротехнологическим показателям с использованием наземных данных и сопряжённых с ними данных ДЗЗ. Параметры агрометеорологических явлений можно интерпретировать как случайные величины, подчиняющиеся определённым вероятностным закономерностям. Проведённые исследования позволяют оценить последствия глобального изменения климата с учётом опасных атмосферных явлений в земледелии путём сопоставления законов распределения урожаев в современном и предполагаемом климате при соответствующих расчётах и анализах рисков. Речь идёт о геостатистических величинах, которые подчиняются определённым геоинформационным описаниям. В работе проанализированы вопросы влияния климатических изменений на риск в аграрном комплексе посредством математических алгоритмов геостатистического характера, в которых неопределённость, связанная с фактором продуктивности сельскохозяйственных территорий, интерпретируется с учётом задания нормального распределения варьирующего агрометеорологического явления.

**Ключевые слова:** целесообразное дифференцирование агротехнологий, точное земледелие, дистанционное зондирование Земли, геостатистический анализ, глобальное изменение климата, мелиорация, риск, градации

Одобрена к печати: 26.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-61-70

### Введение

Необходимым условием развития дифференцированных агротехнологий с целью получения стабильного урожая высокого качества выступает адаптация оптимальных решений агроприёмов к пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных территорий в области растениеводства при эффективной оценке и рациональном использовании всех природных и материально-технических, а также сырьевых ресурсов в предполагаемом климате. Глобальное изменение климата приводит к снижению устойчивости производства в агропромышленном комплексе, а также к росту хозяйственных рисков.

Достижением агроклиматологии в последние годы стало создание различных математических моделей с учётом геостатистического анализа (Isaaks, Srivastava, 1989; Oliver, 2010) для общего и специализированного почвенно-климатического районирования от точки к точке или от региона к региону сельскохозяйственных территорий, которые выступают необходимой основой для стратегии планирования адаптации технологических приёмов.

В этой ситуации большое значение имеет как агроэкологическая, так и количественная оценка урожаев сельскохозяйственных культур различного уровня, получаемых в конкретной местности в производственных условиях, а также оценка, получаемая расчётным путём в соответствии с биоклиматическим потенциалом адаптивно-ландшафтных систем земледелия (Кирюшин, Иванов, 2005).

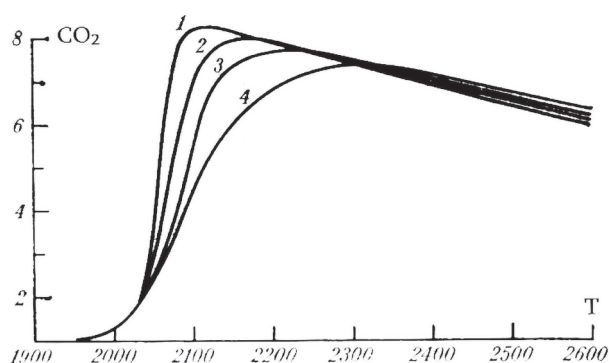


Рис. 1. Прогноз изменения углекислого газа в настоящем и будущем климате; 1–4 — различные варианты развития энергетики

формации. Следовательно, полное обследование сельскохозяйственных территорий оказывается невозможным при учёте стратегии целесообразного планирования технологических воздействий.

Результаты прогностических расчётов по внешним моделям, где изображено изменение во времени массы углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в доиндустриальной атмосфере, приведены на рис. 1.

Анализ представленных графиков показывает, что во всех случаях масса  $\text{CO}_2$  возрастает в несколько раз относительно её доиндустриального значения. Как видно из графического изображения, с учётом темпа на расходование топлива время достижения максимальной концентрации изменяется в пределах от конца 2000 г. до конца 2200 г. Также необходимо отметить, что в ходе современной хозяйственно-технологической деятельности человека за каждое десятилетие безвозвратно расходуются запасы угля, нефти и горючих газов, которые создавались на протяжении миллионов лет (отрицательное влияние разработки месторождений земного шельфа). Следует также отметить, что из-за вырубки лесов и присутствия разных антропогенных опасных явлений скорость роста концентрации  $\text{CO}_2$  дополнительно будет расти, что приведёт к глобальным изменениям климата в течение ближайших десятилетий. В связи с этим возникает вопрос, на какой срок может сохраниться такая высокая концентрация в современном климате, которая отрицательно сказывается как на агропродуктивности, так и на стратегии целесообразного планирования агротехнических решений и социально-экономических сфер. Графические расчёты по имеющимся моделям приводят к выводу, что понижение концентрации с такими темпами будет происходить довольно медленно и продлится более 1000 лет в пространственно-временном континууме ( $D \times T$ ) (рис. 2).

Оценка таких угроз, как увеличение  $\text{CO}_2$  на нашей планете, которая позволяет рассчитать концентрацию атмосферного  $\text{CO}_2$  в будущем климате, предложена в исследовании (Kelling, Bacastow, 1977).

В настоящей работе основное внимание уделено обзору результатов, полученных в наших как теоретических, так и практических исследованиях, направленных на решение этой проблемы. Необходимо учитывать принятые предположения об образовании  $\text{CO}_2$  из ископаемого топлива в будущем климате, влияющие на стратегии адаптации целесообразного планирования агротехнологии и урожайности, это есть производство углекислого газа в разных сценариях.

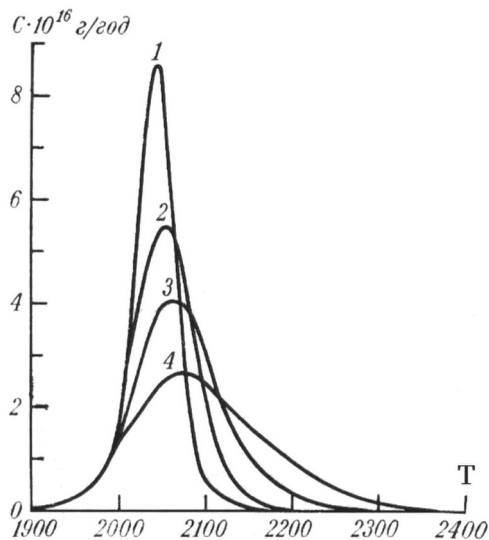


Рис. 2. Прогноз изменения образования углекислого газа в настоящем и будущем климате; 1–4 — различные варианты развития энергетики (на стратегии планирования агротехнологии)

Во многих странах проводятся крупные технологические мероприятия по борьбе с загрязнением атмосферы, которые в будущем должны быть усилены в рамках реализации Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания (ГРОКО).

## Методы исследования

В работе используется анализ эмпирико-статистических моделей и алгоритмов, позволяющих оценивать эффективность технических решений по трём градациям районирования сельскохозяйственных территорий методом нахождения потенциальной эффективности агротехнологии при реализации геостатистических информационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Лупян и др., 2018). В согласовании с теоретическими исследованиями осуществлялась их практическая реализация в полевых условиях. Оценка проводилась на основании данных, полученных со спутника Sentinel-2; для изучения состояния неоднородности оцениваемых участков в пространстве и во времени была проведена кластеризация полей с помощью ДЗЗ (Тугаринов и др., 2020) и выделены отличительные участки по трём основным градациям.

Основу учёта такой почвенно-климатической изменчивости составляет широкое применение вероятностно-статистической методологии, а также кригинг с учётом геостатистического анализа, являющегося научной основой точного земледелия (ТЗ).

Геостатистический подход состоит в том, что при выполнении гипотезы стационарности статистическая структура поля пространственно-распределённого фактора  $F$  может быть описана с помощью вариограммной функции  $\gamma(\vec{h})$ , которая в статистическом смысле представляет собой квадрат разности значений  $F$  в точках на расстоянии  $\vec{h}$  друг от друга. Сдвиг  $\vec{h}$  часто называют лагом или рангом вариограммы. Согласно определению,

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

где  $E$  — операция осреднения;  $\vec{r}$  — расстояние от произвольной точки  $(x, y)$ .

Геостатистические методологии и модели получили широкое распространение в современной аграрной науке (Захарян, 2022), о чём свидетельствует большое количество международных научных журналов, посвящённых применению прикладных математических подходов в области растениеводства. При принятии управленческих и стратегических решений (Комаров и др., 2021) математические модели в рамках ТЗ носят прикладной характер и направлены, прежде всего, для оказания помощи агрономам-технологам хозяйствующего субъекта с учётом глобального изменения климата. При этом основным практическим инструментом смягчения негативных последствий выступают современные технологии прецизионного земледелия.

Прецизионное земледелие (Якушев, 2016) с использованием компьютерных технологий и ДЗЗ, обеспечивающих автоматическое управление движением сельскохозяйственных агрегатов, точное соблюдение технологических нормативов на полигонах ТЗ подтвердили эффективность оптимального планирования и дифференциации агротехнологических решений при типовом агрохимическом обследовании полей по трём градациям (Захарян, 2022).

## Результаты исследований

### Теоретическая база

В ходе исследований принята симметричная схема разбиения области значений исследуемого фактора  $X$  на три градации (рис. 3, см. с. 62). Ширина центральной зоны составляет  $2\Delta$ , где  $\Delta$  задаётся или может выбираться по определённому правилу.

В качестве математического алгоритма в исследовании применяются геостатистический анализ и теория вероятностей для стратегии адаптации агротехнологических решений (Захарян, 2022; Захарян, Комаров, 2019).

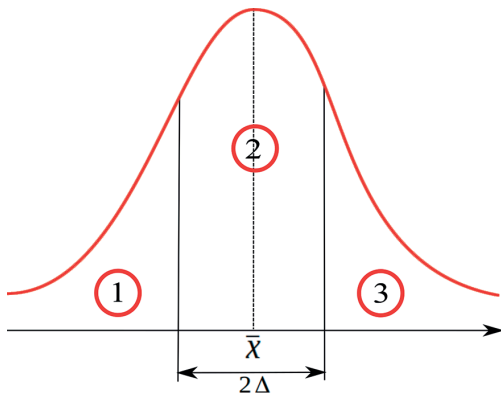


Рис. 3. Районирование территории возможных значений  $X$  на симметричной трёхфазовой градации

В исследовании были применены методы нахождения оптимальной стратегии адаптации целесообразного планирования агротехнологических решений изменяющегося климата и характеристик пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных территорий в системе ТЗ.

Будем считать, что варьирующий агротехнологический параметр характеризуется нормальным распределением, а функция выигрыша  $U(x, d)$ , зависящая от варьирующих параметров ( $x$ ) и технологических воздействий ( $d$ ), описывается экспоненциальной зависимостью с учётом изменения климата в пространственно-временном континууме ( $D \times T$ ).

Когда статистические закономерности пространственного варьирования значения  $x$  описываются в непрерывной форме путём задания некоторой функции плотности распределения  $g(x)$ , получим:

$$g^{(k)} = \int_{\Omega^{(k)}} g(x) dx, \quad k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{2l} & \text{при } x \in \bar{x} \pm l, \\ 0 & \text{при } x \notin \bar{x} \pm l; \end{cases}$$

$l$  — половина диапазона изменения  $x$ , для равномерного закона следует принять  $l = \sigma_x \sqrt{3}$ , где  $\sigma_x$  — среднее квадратическое отклонение. Величина  $g^{(k)}$  может интерпретироваться как вероятность попадания  $X$  в градацию  $\Omega^{(k)}$ .

Математический аппарат даёт возможность использовать полученные соотношения для экспоненциальной модели (Захарян, 2022; Захарян, Янко, 2022). Проанализируем положительную эффективность планирования при дифференциации решений по трём выделенным зонам. При этом по-прежнему будем считать, что варьирующий агрометеорологический параметр характеризуется нормальным распределением, а функция  $U(x, d)$  описывается экспоненциальной зависимостью с учётом глобального изменения климата в пространственно-временном континууме ( $D \times T$ ).

Начнём анализ со случая, когда дифференциация осуществляется путём планирования хозяйственных мероприятий в расчёте на среднее значение  $\bar{X}$  по каждой градации. В этом случае, используя равенство (1), нетрудно получить:

$$\bar{x}^{(k)} = \frac{1}{g^{(k)}} \int_{\Omega^{(k)}} xg(x) dx,$$

где  $\bar{x}^{(k)}$  — среднее значение  $X$  внутри градации  $\Omega^{(k)}$ ;  $g(x)$  — функция плотности распределения;  $g^{(k)}$  может интерпретироваться как вероятность попадания  $X$  в градацию  $\Omega^{(k)}$ ;

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}^{(1)} &= \bar{x} - q\sigma_x, \\ \bar{x}^{(2)} &= \bar{x}, \\ \bar{x}^{(3)} &= \bar{x} + q\sigma_x, \end{aligned} \right\}$$

где  $\bar{x}^{(1)}$ ,  $\bar{x}^{(2)}$ ,  $\bar{x}^{(3)}$  — частные средние по каждой градации;  $q$  — величина, обратная табулированному отношению Миллса и, соответственно, равная:

$$q = \frac{\varphi(\Delta/\sigma_x)}{\frac{1}{2} - \Phi(\Delta/\sigma_x)}.$$

Подставляя выражения  $\bar{x}^{(k)}$  в общую формулу для экспоненциальной модели, можно прийти к следующей зависимости, определяющей величину  $\Delta U_3^{(N)}$  (выигрыш) для рассматриваемой трёхфазной схемы:

$$\Delta U_3^{(3)} = \frac{C_d \cdot [1 - \text{ch}(\theta q) + (1 - e^{-\theta q})\Phi(\theta - \hat{t}) - (1 - e^{\theta q})\Phi(\theta + \hat{t})]}{\gamma \sqrt{2\pi} \cdot \varphi(\theta)},$$

здесь  $\hat{t} = \Delta/\sigma_x$ ;  $C_d$  — стоимость затрат на агротехнологии;  $\theta = \gamma\sigma_x$ ;  $\gamma$  — постоянный коэффициент;  $\sigma_x$  — среднее квадратическое отклонение варьирующего фактора;  $\Phi$  — интеграл вероятности параметра  $\theta$  нормированного агрометеорологического фактора;  $\varphi$  — стандартная нормальная плотность.

Величина  $\Delta U_3^{(3)}$  является функцией двух независимых переменных  $\theta$  и  $\hat{t}$ , причём для любого  $\theta = \text{const}$  существует такое  $\hat{t} = \hat{t}_{\text{опт}}$ , при котором  $\Delta U_3^{(3)}$  максимально. На рис. 4 сплошными линиями изображено семейство кривых, иллюстрирующих указанную закономерность,  $v^{(3)}(\hat{t})|_{\theta=\text{const}}$ . Во всех рассматриваемых случаях кривые  $v^{(3)}(\hat{t})$  имеют максимум при  $\hat{t} \cong 0,6$ . Соответственно, дифференцированное планирование по трём грациям варьирующего почвенно-климатического фактора обладает наибольшей эффективностью при выделении на территории областей, где  $x < \bar{x} - 0,6\sigma_x$ ,  $x \in \bar{x} \pm 0,6\sigma_x$  и  $x > \bar{x} + 0,6\sigma_x$ .

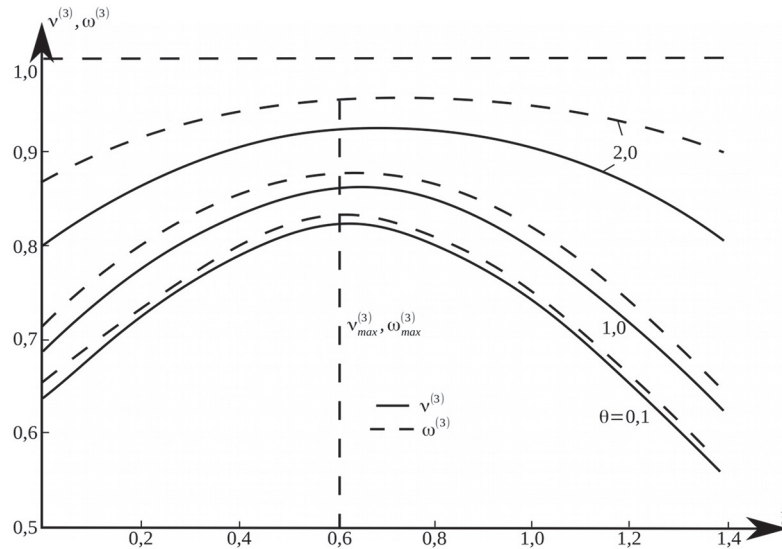


Рис. 4. Зависимость эффективности дифференцированного планирования по трём грациям от ширины центральной грации

Таким образом, можно заключить, что разделение территории по грациям

$$\left. \begin{aligned} \Omega^{(1)} : x \leq \bar{x} - 0,6\sigma_x, \\ \Omega^{(2)} : x \in \bar{x} \pm 0,6\sigma_x, \\ \Omega^{(3)} : x > \bar{x} + 0,6\sigma_x \end{aligned} \right\}$$

может рассматриваться как некоторая оптимальная схема трёхуровневого районирования неоднородной площади, поскольку оно обеспечивает максимальную эффективность дифференцированного планирования для широкого класса практических и хозяйственных задач. То есть применение трёхуровневой грации с учётом стратегии планирования агротехнологии позволяет увеличить экономический выигрыш урожайности сельскохозяйственных территорий. Учитывая вышеуказанное, обосновывается, что уровень пространственной дифференциации представляется рациональным при выборе ширины центральной грации

$2\Delta = 1,2\sigma_x$ , которая иллюстрирует зависимость эффективности дифференцированного планирования агротехнологий (рис. 4) для распределения равномерного и нормального закона Н<sup>0</sup>ДС (недифференцированная стратегия).

Кроме того, как видно из табл. 1, при допущении  $l = \sigma_x \sqrt{3}$  эффективность оптимальной недифференцированной стратегии (Н<sup>0</sup>ДС) и для равномерного, и для нормального закона получается приблизительно одинаковой. Сколько-нибудь заметные различия могут наблюдаться лишь для больших  $\theta$ , превышающих единицу, причём для территорий с «нормальной» неоднородностью оптимальная Н<sup>0</sup>ДС даёт несколько лучшие результаты.

Таблица 1. Сравнительная эффективность оптимального недифференцированного планирования при нормальном ( $\omega_n$ ) и равномерном ( $\omega_p$ ) распределении пространственно варьирующего агрометеорологического фактора

$\theta$	0	0,5	1,00	1,5	2,0	2,5	3,0
$\omega_n$	0	0,06	0,23	0,46	0,69	0,86	0,95
$\omega_p$			0,21	0,40	0,58	0,72	0,83

В табл. 2 приведены рассчитанные по этой формуле значения показателя  $v^{(2)}$ , который рассматривается как функция параметра  $\theta$  при  $\gamma l = \theta\sqrt{3}$ . Здесь же даны значения  $v^{(2)}$  для случая нормального распределения  $X$ . Оценки  $v^{(2)}(\theta)$  в точке  $\theta = 0$  получаются путём соответствующих предельных переходов. В частности, применяя правило Лопиталья, находим:

$$v^{(2)}(0) = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\text{sh}(\theta\sqrt{3}) - 2\text{sh}(\theta\sqrt{3}/2)}{\text{sh}(\theta\sqrt{3}) - \theta\sqrt{3}} = 0,75.$$

Таблица 2. Сравнительная эффективность альтернативной ЧДС для нормального ( $v_n^{(2)}$ ) и равномерного ( $v_p^{(2)}$ ) распределения пространственно варьирующего агрометеорологического фактора

$\theta$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$v_n^{(2)}$	0,64	0,65	0,68	0,74	0,80	0,86	0,90
$v_p^{(2)}$	0,75	0,76	0,78	0,81	0,84	0,87	

Как следует из табл. 2, во всём рассматриваемом диапазоне изменения  $\theta$  переход от недифференцированного планирования к частично дифференцированной стратегии (ЧДС) по градациям  $x \leq \bar{x}$  и  $x > \bar{x}$  в случае равномерного распределения  $X$  даёт несколько больший эффект, чем при нормальном. Максимальные различия характерны для малых  $\theta$ .

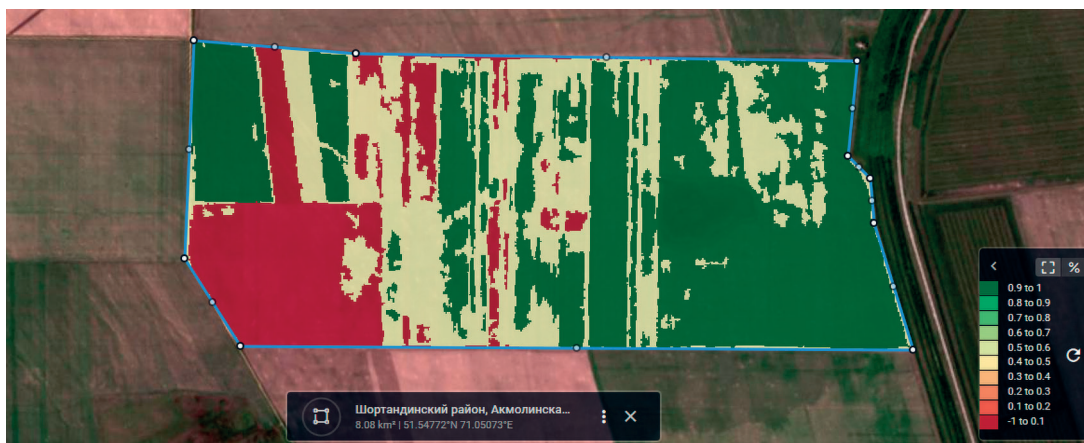
Исследования, проведённые на упрощённых математических моделях «климат – урожай» для трёхфазовых градаций, подтвердили возможность скомпенсировать 75 % отрицательного влияния с учётом глобального изменения климата.

В то же время оценки, приведённые в табл. 2, подтверждают вывод, что при правильно выбранной схеме районирования территории дифференциация решений по трём градациям варьирующего агрометеорологического фактора позволяет скомпенсировать более 80 % потерь, обуславливаемых пространственной неоднородностью территорий.

## Результаты

Примеры реализации приведённых теоретических выкладок в реальной практике хозяйствования представлены в практических работах авторов. Было показано, что при кластеризации участков перспективно использование методов ДЗЗ (Комаров и др., 2021). На основе мате-

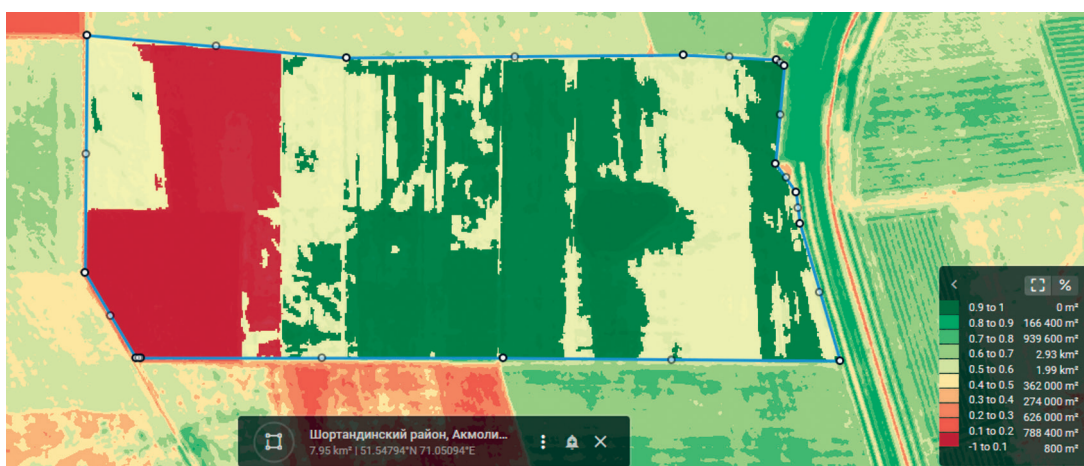
матических моделей, а также и в практике полевых исследований было установлено, что при правильно выбранной схеме районирования территории дифференциация решений по трём грациям варьирующего фактора представляется достаточной. Для доказательства данного положения была проведена кластеризация полей с помощью ДЗЗ и выделены отличительные участки (рис. 5). Кластеризация проводилась для выбранных полей в различные моменты времени.



а



б



в

Рис. 5. Кластеризация полей во времени: а — 29.06.2019; б — 07.07.2019; в — 17.07.2019

Описанная методика реализована с помощью ДЗЗ и создания цифровой модели рельефа (ЦМР). Полученные оценки эффективности кластеризации и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей в условиях Акмолинского региона Казахстана также показаны в работе (Комаров и др., 2021; Abdulaev et al., 2020).

## Заключение

В работе описан подход, основанный на использовании трёхуровневой градации распределения произвольного влияющего фактора, полученного на основе анализа данных ДЗЗ, при принятии решений о целесообразной дифференциации технологий в рамках концепции точного земледелия.

Оценки были получены на основе теоретического подхода и представлены в аналитической форме. Подобное исследование важно, поскольку оно позволяет установить общие закономерности, характерные для широкого класса практических задач.

В частности, показано, что при наличии участка снижения урожая, отвечающего «избыточному» управляющему воздействию, эффект от трёхмерной дифференциации будет гораздо выше, чем при отсутствии такого участка.

В то же время следует отметить, что при неблагоприятных изменениях климата риск серьёзных хозяйственных неудач в агропромышленном комплексе часто может повышаться в несколько раз, тогда как средняя агропродуктивность снижается лишь на проценты.

В работе рассмотрены примеры поведения математических алгоритмов дифференциации решений по трём градациям значения  $X$  и делается вывод, что оптимальность целесообразного планирования агротехнологии зависит от выбора ширины центральной градации, которая составляет  $2\Delta = 1,2\sigma_x$ , т. е.  $\Delta = 0,6\sigma_x$ .

В практическом плане были рассмотрены три разных климатических сценария для принятия дифференциации решений на территориях, отличающихся степенью увлажнения и суммой величин активной температуры. Важный вывод здесь может состоять в том, что необходима разработка алгоритма мелиоративных мероприятий (Гулюк и др., 2020) как по осушению (сценарий гумидного климата), так и по ирригации (сценарий аридного климата).

Выражаем искреннюю признательность кандидату биологических наук, доценту кафедры общей биологии и биотехнологий Национального аграрного университета Армении В. Т. Диланян за помощь и активный интерес к работе и надеемся на дальнейшее сотрудничество с учёными Агрофизического научно-исследовательского института.

## Литература

1. Гулюк Г. Г., Янко Ю. Г., Штыков В. И., Черняк М. Б., Петрушин А. Ф. Руководство по мелиорации полей. СПб.: СПбПУ, 2020. 219 с.
2. Захарян Ю. Г. Геоestatистика: Изменение климата и агротехнологии. М.: Наука, 2022. 457 с.
3. Захарян Ю. Г., Комаров А. А. Перспективы использования геоestatистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 140–148. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148>.
4. Захарян Ю. Г., Янко Ю. Г. Геоestatистика в сельскохозяйственной науке с учётом глобального изменения климата при стратегии планирования агротехнологических решений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 70–78. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78>.
5. Кирюшин В. И., Иванов А. Л. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий: метод. рук. М.: ФГБНУ Росинформагротех, 2005. 784 с.
6. Комаров А. А., Захарян Ю. Г., Ирмулатов Б. Р. Оценка и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 182–191. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191>.



7. Лупян Е. А., Бурцев М. А., Прошин А. А., Кобец Д. А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66>.
8. Тугаринов Л. В., Комаров А. А., Кирсанов А. Д. Оценка корректирующего действия некорневых подкормок с помощью ДДЗ в Краснодарском крае // Изв. Санкт-Петербургского гос. аграр. ун-та. 2020. Вып. 59. № 2. С. 74–81. <http://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-12074>.
9. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
10. Abdulaev K., Irmulatov B., Komarov A., Nugis E. Precision agriculture in the north of Kazakhstan // J. Agricultural Science. 2020. V. 31. No. 2. P. 115–121. <https://doi.org/10.15159/jas.20.25>.
11. Isaaks E. H., Srivastava R. M. Applied Geostatistics. N. Y.: Oxford University Press, 1989. 592 p.
12. Kelling C., Bacastow R. Impact of industrial gases on climate // Energy and Climate. 1977. No. 1. P. 72–95.
13. Oliver M. A. Geostatistical applications for precision agriculture. Dordrecht, UK: Springer Science and Business Media, 2010. 331 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>.

## Assessment of the differentiation of agricultural technologies in three gradations taking into account global climate change

Yu. G. Zakharyan, A. A. Komarov, Yu. G. Yanko

*Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*  
E-mails: [dzhem.m@yandex.ru](mailto:dzhem.m@yandex.ru), [zelenydar@mail.ru](mailto:zelenydar@mail.ru), [yanko@agrophys.ru](mailto:yanko@agrophys.ru)

Based on remote sensing of the Earth (ERS) from space and associated ground-based studies that were carried out in 2018–2022, the results of differentiation of agrotechnological solutions in three gradations are presented. The studies were carried out in different agro-climatic zones: in Leningrad Region on the ranges of precision farming; in Krasnodar Territory; as well as in the natural conditions of Northern Kazakhstan. A detailed study of the spatial and temporal heterogeneity of the state of soil cover in terms of main agrotechnological indicators was carried out on the ranges of precision farming using ground and associated remote sensing data. It is shown that the conditions of a changing climate in the space of a temporal coordinate grid can localize ongoing events (dangerous meteorological phenomena, where and when they occur), which adversely affect both agricultural productivity and the strategy of appropriate planning of agrotechnological solutions, characterized by the density distribution of agrometeorological phenomena. The parameters of agrometeorological phenomena can be interpreted as random variables subject to certain probabilistic patterns. The conducted studies and the consequences of global climate change, taking into account hazardous atmospheric phenomena in agriculture, can be assessed by comparing the laws of distribution of yields in the current and expected climate with appropriate calculations and risk analyses. We are talking about geostatistical quantities that are subject to certain geoinformation descriptions. The paper analyzes the impact of climate change on risk in the agrarian sector by means of mathematical algorithms of a geostatistical nature, in which the uncertainty associated with the productivity factor of agricultural territories is interpreted taking into account the assignment of a normal distribution of a varying agrometeorological phenomenon.

**Keywords:** expedient differentiation of agricultural technologies, precision farming, remote sensing of the Earth, geostatistical analysis, global climate change, land reclamation, risk, gradations

Accepted: 26.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-61-70

## References

1. Gulyuk G. G., Yanko Yu. G., Shtykov V. I., Chernyak M. B., Petrushin A. F., *Rukovodstvo po melioratsii polei* (Field Reclamation Guide), Saint Petersburg: SPbPU, 2020, 219 p. (in Russian).

2. Zakharyan Yu. G., *Geostatistika: Izmenenie klimata i agrotekhnologii* (Geostatistics: Climate change and agricultural technologies), Moscow: Nauka, 2022, 457 p. (in Russian).
3. Zakharyan Yu. G., Komarov A. A., Prospects for geostatistics 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), <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148>.
4. Zakharyan Yu. G., Yanko Yu. G., Geostatistics in agricultural science taking into account global climate change in the strategy of regulating agrotechnological solutions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 70–78 (in Russian), <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78>.
5. Kiryushin V. I., Ivanov A. L., *Agroekologicheskaya otsenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshafnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologii* (Agro-ecological assessment of lands, design of adaptive-landscape systems of agriculture and agricultural technologies), Moscow: Rosinformagrotech, 2005, 784 p. (in Russian).
6. Komarov A. A., Zakharyan Yu. G., Irmulатов B. R., Evaluation and analytical approximation of variograms for agricultural fields in the conditions of the Akmolinsky region of Kazakhstan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 182–191 (in Russian), <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191>.
7. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Evolution of remote monitoring information systems development concepts, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66 (in Russian), <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66>.
8. Tugarinov L. V., Komarov A. A., Kirsanov A. D., Assessment of the corrective action of non-root feeding using DDZ in Krasnodar region, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2020, Vol. 59, No. 2, pp. 74–81 (in Russian), <http://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-12074>.
9. Yakushev V. V., *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika* (Precision farming: theory and practice), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2016, 364 p. (in Russian).
10. Abdulaev K., Irmulатов B., Komarov A., Nugis E., Precision agriculture in the north of Kazakhstan, *J. Agricultural Science*, 2020, Vol. 31, No. 2, pp. 115–121, <https://doi.org/10.15159/jas.20.25>.
11. Isaaks E. H., Srivastava R. M., *Applied Geostatistics*, New York: Oxford University Press, 1989, 592 p.
12. Kelling C., Bacastow R., Impact of industrial gases on climate, *Energy and Climate*, 1977, No. 1, pp. 72–95.
13. Oliver M. A., *Geostatistical applications for precision agriculture*, Dordrecht, UK: Springer Science and Business Media, 2010, 331 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>.