Методы управления агротехнологиями мелиорированных земель с применением принципа минимакса в условиях изменяющегося климата

Ю. Г. Захарян, Ю. Г. Янко

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

Статья посвящена одной из важнейших сторон проблемы «климат и экономика» в области разработки теоретических основ целесообразного использования агрометеорологической информации в сельскохозяйственной сфере и методам оценки её потенциальной экономической эффективности с применением принципа минимакса. Представленные математические алгоритмы дополняются модификациями минимаксных критериев с учётом данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса для планирования целесообразной стратегии агротехнологий в системе мелиорации сельскохозяйственных территорий, которые обосновывают потенциальный положительный эффект повышения агропродуктивности участка «Голино» Меньковского филиала Агрофизического института. Используя геостатистистические подходы, получаемый эффект от применения принципа минимакса с учётом глобального изменения климата при оптимальных стратегиях дифференциации агротехнологических решений будет максимальным, и соответствующее разделение территории может интерпретироваться как перспективная задача экономически оптимального районирования с использованием ДЗЗ. В комплексном плане, в условиях неопределённости оценок будущих изменений климата и их последствий, возникает необходимость подготовки мероприятий по минимизации рисков и разработке государственной стратегии адаптации агротехнологических решений к изменениям пространственной неоднородности сельскохозяйственных территорий. Мониторинг таких изменений посредством ДЗЗ позволяет существенно увеличить масштабы прогнозирования агропродуктивности сельскохозяйственных земель и повысить потенциальную эффективность оперативного контроля состояния сельскохозяйственных культур для управления продукционным процессом в пространственно-временном континууме.

Ключевые слова: изменение климата, геостатистика, мелиорация, агротехнологии, минимаксный подход, мониторинг, стратегия, функция полезности

Одобрена к печати: 29.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-158-166

Введение

В последние годы в сельскохозяйственной науке и практике в области агротехнологических решений широко применяется геостатистическое моделирование и специализированное почвенно-климатическое районирование сельскохозяйственных территорий.

Математическое моделирование даёт возможность решать задачи с большим числом неизвестных. При этом полагается следующее:

а) реальную ситуацию невозможно описать точно;
б) её не следует описывать точно, поскольку основной интерес представляют конкретные ответы на вполне конкретные вопросы;
в) для каждого реального явления можно построить в принципе неограниченное число моделей разной степени детализации;
г) с учётом изложенного выше, каждая модель должна быть целенаправленной, т. е. должна строиться для решения вполне определённого круга задач.

Появившийся в последнее время термин «технология моделирования» означает последовательность операций, которую следует выполнить при разработке моделей, начиная с определения системы и сбора необходимых данных и заканчивая подготовкой технической документации. Таким образом, моделирование приобрело прикладное значение.

Геостатистические методы управления агротехнологиями и подходы к их разработке позволяют оценивать влияние в пространственно-временном континууме ($D \times T$) степени множества состояний погоды; оптимизировать стратегии планирования агротехнологии (Захарян, Янко, 2022), функции выигрыша, показывающего, какие доходы и потери будут иметь место, а также почвенно-климатическую неоднородность сельскохозяйственных территорий с применением принципа минимакса в условиях изменяющегося климата (Oliver, 2010; Webster, Oliver, 2007). Рациональным методом сплошной оценки состояния посевов, хозяйственного планирования объективно становится дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса, которое позволяет получать многофакторную информацию о больших территориях (Лупян и др., 2018), что практически невозможно осуществить при проведении наземных исследований.

Переходя к проблеме применения принципа минимакса в условиях изменяющегося климата и оптимизации стратегий потребителей метеоинформации, будем считать заданными:

а) множество состояний погоды Ω_F, т. е. изменчивости климата, различающихся с точки зрения рассматриваемого потребителя;
б) множество возможных агротехнологических решений (действий) потребителя Ω_d;
в) функцию $u = u(F, d)$, показывающую какие доходы или потери будут иметь место, когда после принятого потребителем агротехнологического решения $d \in \Omega_d$ наблюдаются некоторые погодные условия (изменение климата) $F \in \Omega_F$;
г) множество допустимых к планированию хозяйственных стратегий S, каждая из которых согласно данному определению стратегии потребителя представляет собой совокупность правил, предписывающих потребителю, как он должен действовать в различных ситуациях (при поступлении той или иной метеорологической информации I) с учётом ДЗЗ.

Нет сомнений, что если бы характер погоды был заранее достоверно известен, т. е. имелся абсолютно надёжный метеорологический прогноз, и существовала объективная возможность постоянно «подстраивать» хозяйственные решения под складывающиеся погодные условия, то отыскание оптимальной стратегии стало бы тривиальной задачей: необходимо было бы каждый раз выбирать такое действие (агротехнологическое решение) $d_0 = d_0(F)$, которое обеспечивало бы в данной ситуации достижение максимума дохода или минимума потерь. На самом деле вопрос обстоит сложнее, поскольку, во-первых, потребитель, как правило, имеет о климате лишь ориентировочное представление, а во-вторых, существует широкий класс задач, когда хозяйственное решение принципиально принимается только один раз, и в дальнейшем система должна достаточно эффективно функционировать вне зависимости от складывающихся погодных условий (Якушев, 2016).

Для принятия оптимальных решений в этих случаях необходимо в первую очередь дать чёткое определение самого понятия оптимальности, т. е. сформулировать количественный критерий, позволяющий сравнивать между собой различные варианты действий целесообразного планирования стратегии адаптации агротехнологических решений. Решение этого вопроса зависит от специфики рассматриваемой хозяйственной задачи, при этом указания относительно выбора конкретного критерия вне конкретной задачи давать неэффективно. В то же время существуют некоторые общие подходы и методы исследования, на основе которых можно строить количественные критерии с достаточно широкой областью практического применения. Здесь речь идёт об управлении агротехнологиями сельскохозяйственных земель с учётом принципа минимакса на основе вариограммного анализа с применением геостатистических моделей пространственной корреляции данных для объективного анализа метеорологических полей. Исходя из смысла рассматриваемой задачи для сельскохозяйственных территорий можно предположить, что в этом случае функция потери имеет вид:

$$l(x,a) = L\frac{a-x}{x_2 - x_1},$$

где L — максимальный ущерб от неблагоприятных условий X, меняющийся в диапазоне от x_1 до x_2 ($x_2 > x_1$); a — ожидаемое значение ($a \geqslant x$); l — возрастающая функция разности $\Delta = a - x$.

Методы исследования

В работе используется анализ эмпирико-статистических моделей и алгоритмов, позволяющих оценивать эффективность технических решений для сельскохозяйственных территорий методом нахождения потенциальной эффективности агротехнологии при реализации геостатистических моделей с использованием данных ДЗЗ. Одновременно с теоретическими исследованиями осуществлялась и их практическая реализация в полевых условиях участка «Голино» Меньковского филиала Агрофизического НИИ (ФГБНУ АФИ).

Применительно к анализу метеоролого-экономических систем принцип минимакса и различные модификации соответствующих ему минимаксных критериев оптимальности диктуют потребителю выбор такой стратегии, при которой максимальные потери оказываются минимальными (откуда происходит и сам термин «минимакс»).

Здесь речь идёт о некотором опасном (или просто неблагоприятном) метеорологическом явлении, которое может произойти (состояние F_1) или не произойти (состояние F_2). В зависимости от ожидаемых погодных условий может быть принято одно из двух хозяйственных решений — проводить защитные мероприятия (решение d_1) или не проводить (решение d_2). Условимся считать, что если защитные мероприятия не проводятся, а опасное метеорологическое явление наступает, то хозяйству наносится материальный ущерб, оцениваемый в L единиц стоимости. С другой стороны, если защитные мероприятия проводятся, то на них затрачиваются определённые средства в размере C единиц стоимости, и каковы бы ни были последующие погодные условия, никакого ущерба от неблагоприятной погоды не возникает, т. е. непредотвратимые потери отсутствуют.

Форма представления функции полезности (выигрышей, потерь и т.п.) непосредственно зависит от того, в каком виде задаются множества Ω_d и Ω_F. Наиболее распространён случай, когда оба эти множества дискретны и функция выигрыша $u = u(F, d)$ записывается в виде прямоугольной матрицы, содержащей число строк, равное числу m возможных состояний погоды, и число столбцов, равное числу n возможных хозяйственных решений. Общий вид такой матрицы показан в *табл. 1.*

Таблица 1. Общий вид матрицы полезности (или потерь полезности) при произвольных m и n

F	D					
	d_1	d_2	…	d_j	…	d_n
F_1	u_{11}	u_{12}	…	u_{1j}	…	u_{1n}
F_2	u_{21}	u_{22}	…	u_{2j}	…	u_{2n}
…	…	…	…	…	…	…
F_i	u_{i1}	u_{i2}	…	u_{ij}	…	u_{in}
…	…	…	…	…	…	…
F_m	u_{m1}	u_{m2}	…	u_{mj}	…	u_{mn}

В реальных задачах числа m и n, как правило, бывают невелики, причём встречаются случаи, когда $m > n$, и наоборот, когда $m < n$. Наибольший интерес с точки зрения типичности встречающихся хозяйственных ситуаций представляет простейшая альтернативная схема, когда $m = n = 2$. Соответствующая матрица полезности представлена в *табл. 2.*

Найдём в каждом столбце данной матрицы максимальный элемент:

$$u_j^{\max} = \max_i u(F_i, d_j) \quad \left(i = \overline{1,m}; j = \text{const}\right). \tag{1}$$

Таблица 2. Матрица полезности 2×2

F	D	
	d_1	d_2
F_1	u_{11}	u_{12}
F_2	u_{21}	u_{22}

Чтобы более ясно представить себе суть этого подхода для максимальной эффективности агропродуктивности, обратимся к записанной в формуле (1) матрице $m \times n$, считая для определённости, что входящие в неё элементы $u_{ij} = u(F_i, d_j)$ характеризуют убытки, которые имеют место при различных сочетаниях принимаемых хозяйственных решений и реализующихся погодных условий. Это наибольшие потери, которые может нести потребитель при принятии решения d_j. Анализируя ряд $u_1^{\max}$, $u_2^{\max}$, ..., $u_j^{\max}$, ..., $u_n^{\max}$, легко выявить в нём минимальный элемент $u_{\min} = \min_j u_j^{\max} = \min_j \max_i (F_i, d_j)$ и тем самым найти такое действие d_0, при котором максимально возможные потери минимальны.

Согласно сформулированному в таком виде принципу минимакса оптимальная стратегия агротехнологических воздействий будет состоять в постоянном принятии решения d_0. При этом в каждом конкретном случае, какие бы ни были погодные условия, исключая опасные метеорологические явления, потери никогда не будут выше $u_{\min}$. Нетрудно понять, что если бы мы имели дело не с потерями, а с доходами, то вместо минимаксного критерия следовало бы рассматривать аналогичный ему максиминный критерий, диктующий потребителю выбор такого действия d_0, при котором получаемый выигрыш оказывается не ниже, чем $u_{\max} = \max_j u_j^{\min} = \max_j \min_i u(F_i, d_j)$.

Минимаксный подход может быть также сформулирован и по отношению к метеорологическим потерям. Смысл удовлетворяющей такому критерию оптимальной стратегии агротехнологических решений сводится к ограничению риска, обусловленного несоответствием принятого хозяйственного решения и фактических погодных условий, в том числе опасных почвенно-климатических явлений. При этом гарантируется, что при любой погоде, не учитывая экстремальные климатические явления, метеорологические потери не превзойдут величины $r_{\min} = \min_j \max_i r(F_i, d_j)$, где $r(F_i, d_j)$ — элементы матрицы метеорологических потерь.

Результаты исследования

Следует отметить, что оптимальная стратегия планирования решения, удовлетворяющая критерию минимакса абсолютных потерь, и стратегия минимакса метеорологических потерь в общем случае не совпадают и предписывают потребителю принятие разных адаптивных систем, как и целесообразное дифференцирование агротехнологических решений (Кирюшин, Иванов, 2005). В изложенных простейших версиях принцип минимакса отражает предельно осторожную позицию, когда потери свыше определённого уровня вообще не допускаются. Никакой информации о повторяемости различных метеорологических ситуаций для реализации таких стратегий агротехнологических решений не требуется.

Необходимость детального изучения вопросов минимакса в сельскохозяйственной науке обуславливается, по крайней мере, двумя обстоятельствами. Во-первых, как показывает опыт, различные отрасли народного хозяйства постоянно предъявляют к метеорологическому обеспечению, в частности к достоверности и заблаговременности прогнозов, всё новые, более жёсткие требования, что объективно обусловлено усложнением самих производственных процессов. Однако имеющаяся агрометеорологическая информация зачастую используется потребителями неполно, а иногда и просто неправильно, в результате чего эффективность принимаемых хозяйственных агротехнологических решений существенно снижается. Второе обстоятельство, на которое хотелось бы обратить внимание, состоит в том,

что оптимальные стратегии планирования агротехнологий, удовлетворяющие условию минимакса (максимина) ожидаемых результатов, как правило, принадлежат к классу смешанных, что также даёт максимальную эффективность использования ДЗЗ из космоса и позволяет целесообразно учитывать эту информацию при планировании агротехнологических решений для повышения потенциальной эффективности сельскохозяйственных территорий (Якушев и др., 2022). На примере участка «Голино» Меньковской опытной станции Агрофизического НИИ (*рисунок*) показана эффективность применения ДЗЗ. Расшифровка космических снимков и снимков беспилотных летательных аппаратов подтверждает наличие и позволяет уточнить расположение подземных дренажей, построенных для осушения сельскохозяйственного поля. Технически исправная осушительная мелиоративная система участка «Голино» позволяет увеличивать урожайность выращиваемых культур на 30 %.

План-схема участка мелиорации «Голино» Меньковского филиала ФГБНУ АФИ

Рассмотрим некоторые модификации минимаксных критериев, накладывающих на действия потребителя менее жёсткие ограничения, с учётом ДЗЗ из космоса и имеющегося потенциально положительного эффекта как при планировании целесообразной стратегии агротехнологии, так и в системе мелиорации сельскохозяйственных территорий (Гулюк и др., 2020).

Используя ту же, что и раньше, метеоролого-экономическую модель, положим, что при задании любой стратегии S потребителю метеоинформации становится известна совокупность условных вероятностей $P_S\left(d_j \middle| F_i\right)$, показывающих, с какой частотой принимаются различные технологические решения d_j при наступлении определённых погодных условий F_i. В ходе исследований выявляется, что если эти вероятности известны, то легко подсчитать, каковы будут средние (в статистическом смысле) потери данного потребителя, ожидаемые

при том или ином типе погоды. Обозначая их через $U(F_i)$, можно записать, что для произвольного F_i

$$U(F_i) = \sum_{j=1}^{n} u(F_i, d_j) P_S\left(d_j \middle| F_i\right).$$

Рассчитав эти величины для всех $i = \overline{1,m}$, нетрудно найти среди них максимум $U^{\max} \max_i U(F_i)$ $(i = \overline{1,m})$, который будет отвечать какому-то определённому типу климата $F \in \Omega_F$.

Определяя величины $U^{\max}$ для всей совокупности допустимых стратегий $\langle S \rangle$, можно сформулировать следующий принцип оптимальности. Наилучшей считается стратегия технологических решений, для которой максимальные ожидаемые потери минимальны. Иначе говоря, для оптимальной в указанном смысле стратегии S_0 должно удовлетворяться условие:

$$U_0^{\max} = \min_{\langle S \rangle} U^{\max}.$$

Очевидно, что рассмотренному минимаксному критерию будет соответствовать аналогичный максиминный критерий для расчёта ожидаемых доходов, ориентирующий потребителя на выбор стратегии 5 %, для которой справедливо, что

$$U_0^{\min} = \max_{\langle S \rangle} U^{\min},$$

где $U^{\min} = \min_i U(F_i)$.

Геостатистический минимаксный критерий (Захарян, 2022; Isaaks, Srivastava, 1989) может быть также сформулирован и по отношению к ожидаемым метеорологическим потерям. Обозначая максимум ожидаемых метеорологических потерь при произвольной стратегии S через $R^{\max}$, можно записать, что в данном случае для оптимальной стратегии S_0

$$R_0^{\max} = \min_{\langle S \rangle} R^{\max}, \tag{2}$$

где $R^{\max} = \max_i R(F_i) = \max_i \sum_{j=1}^{n} r(F_i, d_j) P_S\left(d_j \middle| F_i\right)$.

Для территории Ленинградской области были применены геостатистические модели, которые позволяют выполнять расчёты и аналитическую аппроксимацию эмпирических вариограмм. Следует отметить, что переход традиционного аграрного производства к стратегии планирования методов управления технологических решений может быть оправдан лишь в тех случаях, когда значение нормированной вариограммы не является слишком малым и представляет интерес для конкретной задачи. Для получения таких вариограммных оценок обычно используется формула:

$$\gamma^*(\vec{h}) = \frac{1}{2n(\vec{h})} \sum_{i=1}^{n} \left[f(\vec{r}_1 + \vec{h}) - f'(\vec{r}_1) \right]^2,$$

где * отличает эмпирическую оценку от соответствующей теоретической величины; $\gamma^*(\vec{h})$ — число пар точек с взаимным расстоянием $\vec{h}$, по которым производится осреднение. Эмпирическая вариограмма рассчитывается для поля отклонений $f'(\vec{r})$. Во всех статистических исследованиях теоретические параметры распределения изучаемых случайных величин (процессов, полей) заменяются эмпирическими оценками при использовании подхода минимакса, которые рассчитываются по конечным выборкам, т. е. определяются на основании ограниченного по объёму экспериментального материала.

Говоря о климате, всегда следует помнить, что по своей сути климат есть понятие статистическое, определяющее для каждой географической точки (области, региона, зоны) специфическую и относительно устойчивую во времени повторяемость различных погодных условий, в том числе и опасных метеорологических явлений.

Рассматривая стационарный климатический режим, т. е. предполагая, что на определённом временном интервале в N лет климатические условия не меняются, мы тем самым допускаем существование некоторого статистически однородного ансамбля погодных реализаций

и в рамках таких статистических представлений можем рассматривать различные климатические факторы как случайные величины, характеризующиеся собственными законами распределения. Очевидно, что случайной величиной оказывается при этом и потенциал продуктивности, существенно зависящий от ежегодно варьирующихся погодных факторов. При этом задача оценки последствий климатических изменений естественным образом сводится к сопоставлению распределения, описывающего межгодовую изменчивость выбранного показателя потенциала продуктивности и критерия риска в условиях современного и предполагаемого климата (Захарян и др., 2023).

Следует остановиться на самом понятии риска. На первый взгляд может казаться, что по поводу данного термина никаких вопросов возникать не должно. Однако это не так. Несмотря на кажущуюся прозрачность, смысл указанного понятия в действительности не столь очевиден, особенно если принять во внимание желание получать в дальнейшем соответствующие количественные оценки.

Использование термина «риск» на бытовом уровне достаточно очевидно. Как правило, говоря о риске, мы имеем в виду шансы возникновения некоторых опасных ситуаций, которые ведут к недопустимо большим хозяйственным или иным потерям. Однако это лишь самое общее представление. Более строгое математическое определение риска дать сложнее, причём в различных экономических моделях, теории игр, страховом деле и других областях риск может определяться и оцениваться по-разному.

Применительно к интересующей нас проблеме оценки влияния изменений климата на земледелие понятие риска предлагается ассоциировать с вероятностью или, что, в сущности, то же самое, с климатической повторяемостью снижения потенциала продуктивности за некоторый критический уровень. В данном смысле можно говорить о риске «крупных потерь».

Как показывает анализ, предпочтительность использования критерия риска по сравнению с оценками ожидаемого изменения продуктивности определяется, по крайней мере, двумя обстоятельствами. Во-первых, не вызывает сомнений, что именно серьёзные неудачи и их повторяемость (а отнюдь не средние результаты!) имеют первостепенное значение с точки зрения правильной оценки уровня безопасности и устойчивости функционирования любых производственных систем, с учётом геостатистического минимаксного критерия при произвольной стратегии, записанной в формуле (2), в том числе в такой существенно зависящей от погоды отрасли, как земледелие. Во-вторых, чрезвычайно важным моментом является чувствительность выбранного хозяйственного показателя к происходящим климатическим изменениям. Несомненный приоритет в данном отношении принадлежит рискам. На фоне относительно небольших колебаний средних многолетних показателей риски экстремальных ситуаций, оцениваемые по соответствующим вероятностям, могут меняться, поскольку, наряду с относительно небольшим снижением средней урожайности, в новых климатических условиях в три-четыре раза возрастут риски лет с аномально низким потенциалом продуктивности.

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что эффективная адаптация сельскохозяйственного земледелия к новому климату может потребовать принятия кардинальных мер, например, корректировку структуры посевных площадей, внедрение новых агротехнологий, возможное расширение масштабов орошаемого земледелия и многое другое, т. е. применение детально дифференцированной стратегии и частично дифференцированной стратегии с учётом геостатистического анализа, в том числе используя принцип минимакса как перспективное направление при альтернативном прогнозе с учётом компромиссных решений.

Заключение

Представленные теоретические подходы использования методов геостатистики могут быть полезны для количественной оценки целесообразности перехода к применению принципа минимакса в условиях изменяющегося климата на заданном сельскохозяйственном участке.

Поиск эффективных путей повышения устойчивости урожаев, таких как минимаксный подход, следует рассматривать как одно из перспективных направлений адаптации земледелия к изменяющемуся климату. Разрабатываемый подход может быть использован для расчёта потерь урожая, вызываемых пространственным варьированием лимитирующего агрометеорологического фактора, а эффект от применения принципа минимакса будет выше, чем при отсутствии такого подхода. Данная работа направлена на оказание помощи агрономам при разработке стратегии планирования и целесообразном выборе агротехнологических решений.

Литература

1. *Гулюк Г. Г.*, *Янко Ю. Г.*, *Штыков В. И.*, *Черняк М. Б.*, *Петрушин А. Ф.* Руководство по мелиорации полей. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2020. 219 с.
2. *Захарян Ю. Г.* Геостатистика: изменение климата и агротехнологии. М.: Наука, 2022. 457 с.
3. *Захарян Ю. Г.*, *Янко Ю. Г.* Геостатистика 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78.
4. *Захарян Ю. Г.*, *Комаров А. А.*, *Янко Ю. Г.* Оценка дифференциации агротехнологий по трём градациям с учётом глобального изменения климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 61–70. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-61-70.
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. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
7. *Якушев В. В.* Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
8. *Якушев В. П.*, *Захарян Ю. Г.*, *Блохина С. Ю.* Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 287–294. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-287-294.
9. *Isaaks E. H.*, *Srivastava R. M.* Applied Geostatistics. N. Y.; Oxford: Oxford University Press, 1989. 592 p.
10. *Oliver M. A.* Geostatistical applications for precision agriculture. Dordrecht; Heidelberg; L.; N. Y.: Springer Science and Business Media, 2010. 331 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9133-8.
11. *Webster R.*, *Oliver M. A.* Geostatistics for environmental scientists. Chichetster, UK: John Willey and Sons, 2007. 336 p. DOI: 10.1002/9780470517277.

Management methods of agrotechnology of reclaimed lands using the minimax principle in a changing climate

Yu. G. Zakharyan, Yu. G. Yanko

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

This article is devoted to one of the most important aspects of the problem of climate and economy in the field of development of theoretical foundations for the appropriate use of agrometeorological information in agriculture and methods for assessing its potential economic efficiency using the minimax principle. The presented mathematical algorithms are supplemented by modifications of the minimax criteria taking into account Earth remote sensing (ERS) data from space for planning an appropriate strategy of agricultural technologies in the melioration system of agricultural territories, which substantiate the potential positive effect of increasing the agricultural productivity of the Golino site of the Menkovsky Branch of the Agrophysical Research Institute. Using geostatistical approaches in agricultural science, the effect obtained from applying the minimax principle taking into account global

climate change with optimal strategies for differentiating agrotechnological solutions will be maximal, and the corresponding division of the territory can be interpreted as a promising task of economically optimal zoning using ERS. In a comprehensive plan, in conditions of uncertainty of assessments of future climate changes and their consequences, there is a need to prepare measures to minimize risks and develop a state strategy for adapting agrotechnological solutions to changes in the spatial heterogeneity of agricultural territories. Monitoring such changes using remote sensing allows for a significant increase in the scale of forecasting the productivity of agricultural lands and increasing the potential effectiveness of operational monitoring of the state of agricultural crops to manage the production process in the space-time continuum.

Keywords: climate change, geostatistics, melioration, agrotechnologies, minimax approach, monitoring, strategy, utility function

Accepted: 29.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-158-166

References

1. Gulyuk G. G., Yanko Yu. G., Shtykov V. I., Chernyak M. B., Petrushin A. F., *Rukovodstvo po melioratsii polei* (Field reclamation guidelines), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2020, 219 p. (in Russian).
2. Zakharyan Yu. G., *Geostatistika: izmenenie klimata i agrotekhnologii* (Geostatistics: Climate change and agrotechnology), Moscow: Nauka, 2022, 457 p. (in Russian).
3. 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, V. 19, No. 2, pp. 70–78 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-70-78.
4. Zakharyan Yu. G., Komarov A. A., Yanko Yu. G., Assessment of the differentiation of agricultural technologies in three gradations taking into account global climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 3, pp. 61–70 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-61-70.
5. Kiryushin V. I., Ivanov A. L., *Agroehkologicheskaya otsenka zemel'*, *proektirovanie adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologii. Metodicheskoe rukovodstvo* (Agroecological assessment of lands, design of adaptive-landscape farming systems and agricultural technologies. Methodological guide), Moscow: FGBNU Rosinformagrotekh, 2005, 784 p. (in Russian).
6. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Evolution of remote monitoring information systems development concepts, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 3, pp. 53–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
7. Yakushev V. V., *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika* (Precision farming: theory and practice), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2016, 364 p. (in Russian).
8. Yakushev V. P., Zakharyan Yu. G., Blokhina S. Yu., Current problems and prospects for the use of remote sensing of the Earth in agriculture, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 1, pp. 287–294 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-287-294.
9. Isaaks E. H., Srivastava R. M., *Applied Geostatistics*, New York; Oxford: Oxford University Press, 1989, 592 p.
10. Oliver M. A., *Geostatistical applications for precision agriculture*, Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer Science and Business Media, 2010, 331 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9133-8.
11. Webster R., Oliver M. A., *Geostatistics for environmental scientists*, Chichetster, UK: John Willey and Sons, 2007, 336 p., DOI: 10.1002/9780470517277.