

Перспективы использования геостатистических анализов в практике растениеводства

Prospects of geostatistical analyses use in crop growing practice

Захарян / Zaharyan Y.

Юрий Гайказович

(Dzhem.m@yandex.ru)

кандидат технических наук, профессор,

доктор сельскохозяйственных наук.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт (ФГБНУ АФИ),

ведущий научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Кирсанов / Kirsanov A.

Андрей Дмитриевич

(andrkkir88@gmail.com)

ФГБНУ АФИ,

младший научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Комаров / Komarov A.

Андрей Алексеевич

(zelenydar@mail.ru)

ФГБНУ АФИ,

главный научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: пространственная неоднородность – spatial inhomogeneity; дифференцированный подход – differentiated approach; точное земледелие – precision agriculture; геостатистика – geostatistics.

Рассматриваются различные варианты пространственной дифференциации с учетом варьирующих геостатистических факторов, и соответствующее разделение территории может интерпретироваться как задача экономически оптимального районирования (при условии, когда $x = a_0$).

На основании критериев неоднородности по почвенным, агроклиматическим, NDVI-индексу развития растений и урожайности на оцениваемых полигонах предпринята попытка произвести оценку состояния территорий с использованием аппарата геостатистики.

Various variants of spatial differentiation are considered based on varying geostatistical factors, and corresponding territory segregation can be interpreted as problem of economically optimal zoning (under condition when $x = a_0$).

Based on criteria of inhomogeneity in soil and agroclimatic conditions, NDVI index of development of plants and crop yield on evaluated polygons, an effort has been made to assess territory condition using geostatistical tools.

Введение

Геостатистический метод все шире используется в практике сельскохозяйственного производства, однако концептуальные подходы изложены и

рассматриваются модели стратегического анализа на основе геостатистических и экономико-математических методов. Теоретически исследованы варианты при нормальном распределении плотности вероятности по факторам продуктивности, которая трактуется, что согласно концепции всегда существует некоторый оптимальный уровень или степень пространственной дифференциации решений. Для его нахождения, необходимо, в первую очередь, выяснить, в какой степени тот или иной частично дифференцированный подход может компенсировать отрицательное влияние почвенной, агрофизической, агрохимической, агроклиматической неоднородности, и какова должна быть детальность дифференциации. Исследования направлены на изучение именно этого вопроса по фактору агроклиматической неоднородности.

Методические аспекты, объекты исследований

В качестве объектов исследований выбраны сельскохозяйственные территории S , дифференцированные по значениям варьирующих геостатистических факторов

$x = x_1, x_2, \dots, x_n$, соответствующие площади $\sum_{i=1}^n q_i = 1$. Весь

диапазон наблюдаемого пространства разделен на N не пересекающихся градаций $\Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \dots, \Omega^{(n)}$ и соответственно расклассифицирован множеством однородных зон n , группы $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(N)}$. Дифференцированное планирование по градациям пространственно варьирующего геостатистического фактора X представлено на рис. 1.

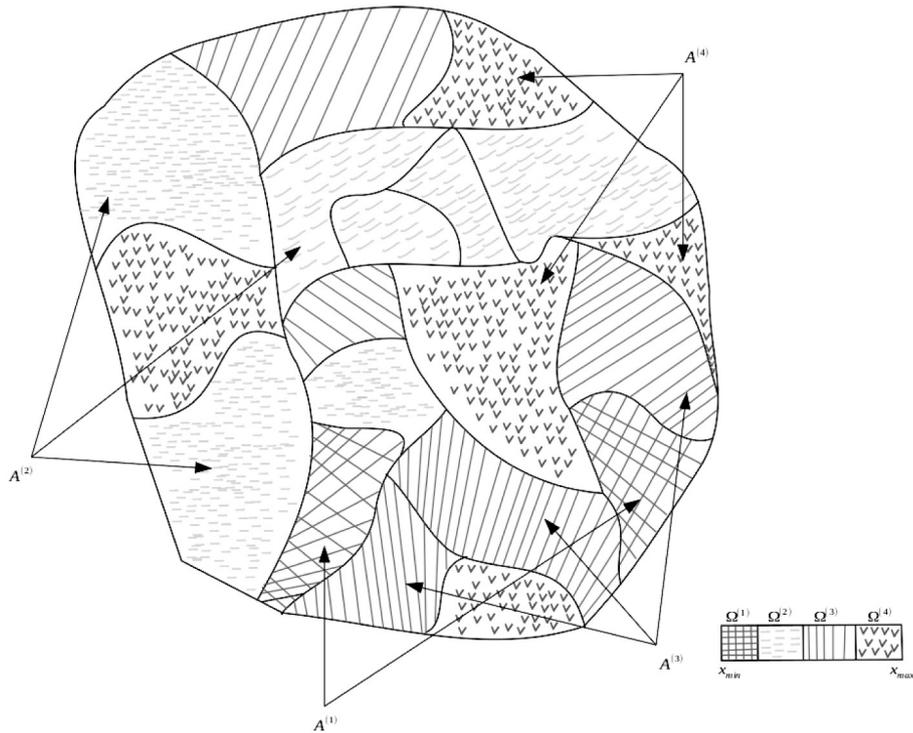


Рис. 1. Дифференцированное планирование по градациям пространственно варьирующего геостатистического фактора X
 a – соединение однородных зон в группы $A^{(1)}, A^{(2)}, A^{(3)}, A^{(4)}$ по градациям $\Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \Omega^{(3)}, \Omega^{(4)}$ фактора X .

Для вычисления оптимальной дифференциации ориентировано на значение геостатистического фактора, когда $x = a_0$, который, в свою очередь, определяется по формуле [1]:

$$a_0 = -\frac{1}{\gamma} \ln \sum_{i=1}^n q_i e^{-\gamma x_i}, \quad (1)$$

Это выражение показывает, что для экспоненциальной модели a_0 не зависит от экономических характеристик задачи, а определяется пространственно варьирующими параметрами [1, 2], характеризующимися набором чисел (q_1, q_2, \dots, q_n) и параметром модели γ , путем задания некоторой функции плотности распределения $q(x)$:

$$\Delta U^{(N)} = \frac{C_d}{\gamma} \sum_{i=1}^N \int_{\Omega^{(i)}} \left\{ e^{-\gamma(x-\bar{x})} - e^{-\gamma(x-x^{(N)})} \right\} q(x) dx, \quad (2)$$

где, $\Delta U^{(N)}$ – дополнительный выигрыш на единицу площади при переходе к дифференциации по (N) градациям, C_d – затраты на планируемые агротехнологии, $\Omega^{(n)}$ – число градации варьирующего фактора, $x, x^{(N)}$ – среднее значение x внутри градации $\Omega^{(n)}$, определяемого как:

$$\bar{x}^{(N)} = \frac{1}{q^{(N)}} \int_{\Omega^{(n)}} x q(x) dx, \quad (3)$$

Величина $q^{(N)}$ может интерпретироваться как вероятность попадания x в градации $\Omega^{(n)}$, и следовательно описываться в виде:

$$\bar{x}^{(N)} = \frac{1}{q^{(N)}} \int_{\Omega^{(n)}} x q(x) dx, \quad (4)$$

Рассматривая различные варианты районирования территории (рис.2), разделяем некую территорию вначале на зоны с $x \leq \bar{x}$ и $x > \bar{x}$, далее – на зоны с $x < \bar{x} - \Delta, x \in \bar{x} \pm \Delta$ и $x > \bar{x} + \Delta$ (где Δ – задано), переходя, в дальнейшем, к четырем, пяти и т. д.

При N -уровневой схеме классификации рассчитываются каждый раз величины $\Delta U_3^N, \Delta U_4^N$ и ΔU_s^N , т. е. где дополнительные выигрыши по трем, четырем и пяти градациям, могут дать ясное представление о том, как с ростом детальности пространственной дифференциации решений компенсируются потери, вызываемые агрометеорологической неоднородностью территории. В сопоставлении с зависимостью характеризующей возрастание технологических затрат, это дает возможность обосновать оптимальный вариант дифференцированного планирования.

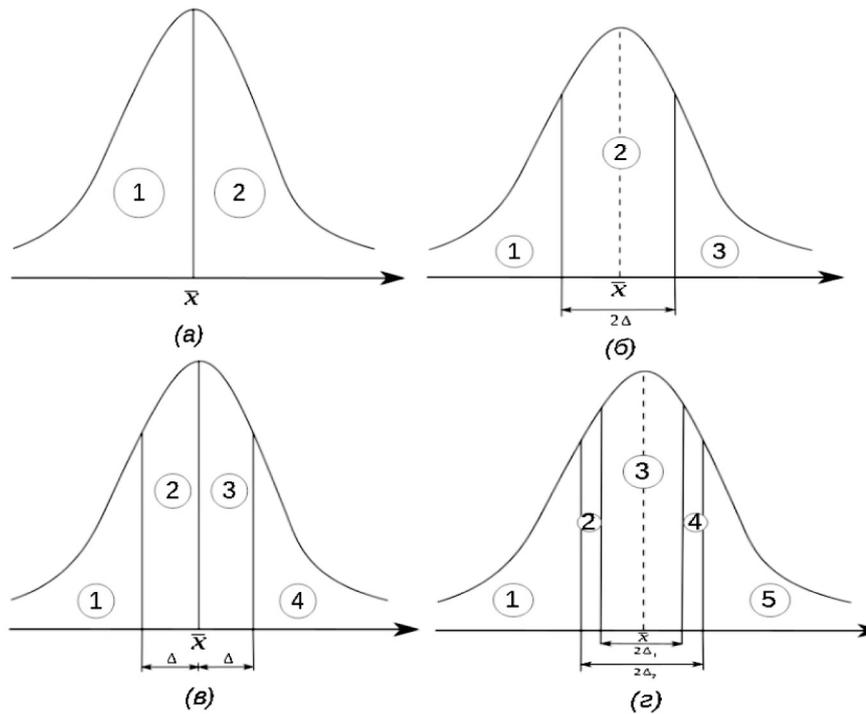


Рис 2. Варианты деления области возможных значений варьирующего геостатистического фактора x на градации;
 а) альтернативная схема;
 б), в), г) – симметричные трех-, четырех- и пятиуровневая схема дискретизации

Следует отметить, что при одном и том же N , т. е. при одинаковой детальности дифференциации, эффективность соответствующей стратегии будет зависеть от того, по каким градациям X произведено районирование территории. Например, если речь идет о симметричной трехуровневой схеме [$x \leq \bar{x} - \Delta, x \in \bar{x} \pm \Delta, x \geq \bar{x} + \Delta$], то здесь принципиальное значение имеет выбор величины Δ , определяющей ширину центральной градации. При некотором Δ эффект от дифференциации решений будет максимальным и соответствующее разделение территории может интерпретироваться как задача экономически оптимального районирования.

Для анализа частично дифференцированного планирования предусматривается проведение численных экспериментов над конкретно картированной неоднородностью. В то же время в ряде случаев интересные оценки могут быть получены на основе теоретического подхода и представлены в аналитической форме с помощью геостатистики вероятностного математического аппарата, учитывая вариабельности почвенно-климатических факторов.

Подобное исследование важно, поскольку оно позволяет установить детерминированный подход характерный для широкого класса практических задач.

В качестве критериев дифференциации использованы тестовые площадки дистанционного зондирования по полигонам (рис. 3), расположенным в разных

почвенных условиях и различных агроклиматических районах. Единство различия состояло в однотипности агротехнологий возделывания одинаковых культур [3, 4] (в данном случае многолетних трав).

Рассмотрим характеристики следующих полигонов: тестовый полигон ЗАО «Мельниково», расположен в лесной зоне Западно-Европейской провинции Балтийско-Ладожского округа Приозерского района Ленинградской области. Участок полигона располагается на площади 28 га. Полигон расположен в агроклиматическом районе Карельского перешейка, где климат смягчен влиянием его приморского положения и поэтому растительность южной тайги достигает здесь наиболее высокой широты своего расположения. Среднегодовая сумма активных температур выше 10°C – 1500–1700, среднегодовая сумма осадков – 468–674 мм, в том числе за период с температурами выше 10°C – 222–275 мм. Территория полигона расположена на равнинной местности с пологим северо-западным уклоном. Полигон располагается на характерных для данной зоны дерново-подзолистых глеевых почвах, занимающих около 29% от общей площади сельскохозяйугодий. Полигон размещается на территории землепользования ЗАО «Мельниково» в межсельговом понижении, участок ровный на осушаемой пашне.

Оценка состояния растений по полигонам проводилась в динамике (в одно и тоже время) на основе определения величины вегетационного индекса NDVI [4, 7].



Рис. 3. Карта размещения полигонов на территории Ленинградской области

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс, позволяющий произвести комплексную оценку состояния агроэкосистем, состояния растительности (развития сельскохозяйственных культур), оценку изменений плодородия почв. Это один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих как качественные, так и количественные оценки растительного покрова и плодородия почв. Индекс позволяет выявить и идентифицировать в текущем периоде времени состояние возделываемых культур с точностью степени разрешения аэро и космоснимка. NDVI вегетационный индекс вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (5)$$

где, NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Для идентификации признаков формируется специфическая шкала с оцененными значениями вегетационного индекса (рис. 4).

Результаты и обсуждение

Для оценки использования геостатистических анализов в практике растениеводства предпринята попытка выявления текущего состояния полей, расположенных в сети мониторинговых полигонов в одном из регионов РФ (рис. 3) [3, 4]. Для анализа неоднородности развития растений по территории каждого полигона в пространстве и во времени, а также для оценки развития растений во времени использовался показатель вегетационного индекса NDVI.

Оценка величин вегетационного индекса NDVI, проведенная на тестовом полигоне № 1 (рис. 5), указывает на неоднородность развития растений по территории полигона в пространстве и во времени. Эти показатели неоднородности развития растений могут быть обусловлены особенностью изменений почвенно-климатических факторов по полям и контурам данного региона. В целом по представленному полигону условия для роста и развития трав в вегетационный период текущего года сложились весьма благоприятными. Обусловлено это оптимальным сочетанием жарких погодных условий вегетационного периода с повышенным увлажнением почв на этом полигоне.

В целом по полигону отмечено относительно равномерное развитие растительного покрова, т.е. критерий дифференциации, с точки зрения неоднородности территории по данному варьирующему фактору – выражен слабо. В первый период наблюдений (22.06.2014) отмечен вегетационный индекс 0,6–0,7, характеризующий интенсивфикацию ростовых процессов. Несколько отличается вегетационный индекс на элементарном участке № 4 и, частично, на участке № 3. На этих участках вегетационный индекс более высокий 0,8–0,9 и характеризует большее накопление хлорофилла, биомассы и интенсивность развития трав. Состояние травостоя на этих участках хорошее.

В целом по полигону отмечена дифференциация вегетационного индекса от 0,55 до 0,85 по элементарным участкам. Наибольший вегетационный индекс характеризует участки № 2, № 4 и, частично, № 5.

Второй срок наблюдений (20.07.2014) показал, что участок № 3 снижал показатель вегетационного индекса по сравнению с более ранним периодом (июнь). Последнее

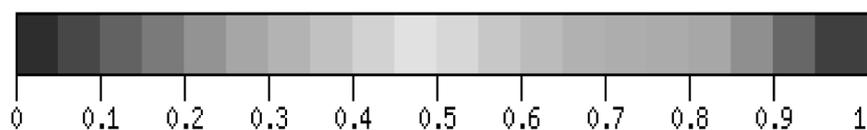


Рис. 4. Шкала оценки вегетационного индекса NDVI

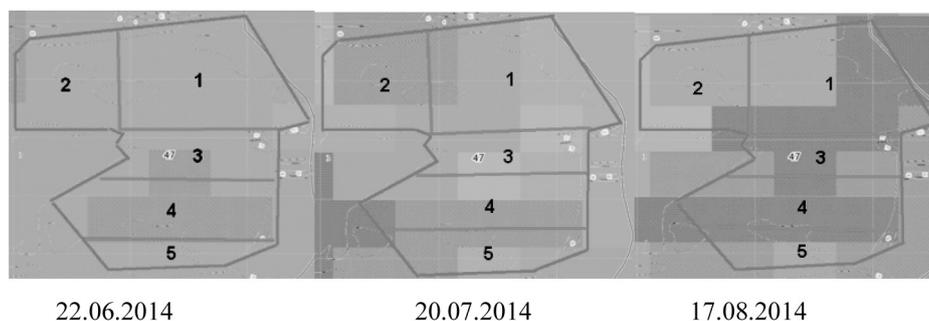


Рис. 5. Изменение состояния растений за вегетационный период на полигоне ЗАО «Мельниково»

указывает на уменьшение накопления хлорофилла в травах и снижение кормовой ценности травостоя. На участке № 4 кормовая ценность травостоя сократилась на 10–20%. На участке № 2 отмечено увеличение вегетационного индекса и накопление хлорофилла, данный участок в состоянии оптимальном для уборки.

Критерий неоднородности развития растений по вегетационному индексу согласовался с данными по урожайности культуры, при этом отбор образцов осуществлялся по каждому из участков неравномерности (1–4 на плане).

Тестовый полигон ЗАО «Осьминское» расположен в лесной зоне Северо-Западной Европейской провинции Лужско-Оредежского округа Сланцевского района Ленинградской области в самом теплом Юго-Западном районе области. Среднегодовая сумма активных температур выше 10°C – 1700–1900, среднегодовая сумма осадков – 510–604 мм, в том числе за период с температурами выше 10°C – 275–300 мм. Площадь полигона 25,8 га.

На данном полигоне идентифицирована дерново-слабоподзолистая слабооглеенная, суглинистая почва, залегающая на карбонатной морене.

Характер изменения развития растений на полигоне представлен на рис. 6.

Оценка динамики вегетационного индекса за июль–август по элементарным участкам показывает нарастание вегетационного индекса с 0,55–0,75 в июне до 0,75–0,87 в июле. В июле–августе на части элементарных участков № 4 и № 2 отмечено возрастание

вегетационного индекса до самых высоких показателей – 0,95, что характеризует наибольшее накопление хлорофилла в вегетирующих растениях.

На полигоне отмечена большая неравномерность роста и развития растений по элементарным участкам, относительно ранее рассмотренного полигона. Данные учета урожайности сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне в 2014 году представлены в табл. 2.

Тестовый полигон ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО» Тихвинского района расположен в лесной зоне Северо-Западной Европейской провинции Ленинградской области в восточном сельскохозяйственном районе, где, по сравнению с другими районами области, климат умеренно теплый со следующими характеристиками: среднегодовая сумма активных температур выше 10°C – 1600–1800, среднегодовая сумма осадков – 577–629 мм, в том числе за период с температурами выше 10°C – 225–275 мм.

Участок полигона располагается в пределах кормового севооборота. Площадь полигона 26,3 га. Территория полигона расположена на равнинной местности.

На данном полигоне возделываются многолетние травы. Травостой представлен преимущественно злаковыми травами. В целом по полигону равномерное развитие растительного покрова (рис. 7). При весенней диагностике отмечен вегетационный индекс 0,55–0,7 который характеризует интенсификацию весенних ростовых процессов. Несколько отличается вегетационный индекс на элементарном участке № 1 и 3. На этих участках вегетационный индекс более высокий –

Таблица 1

Урожайность сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне ЗАО «Мельниково» в 2014 году

№ п.п.	Тестовый полигон	Сельскохозяйственная культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				Средняя урожайность по полигону
			1	2	3	4	
1	ЗАО «Мельниково»	Многолетние травы	164	158	172	182	169

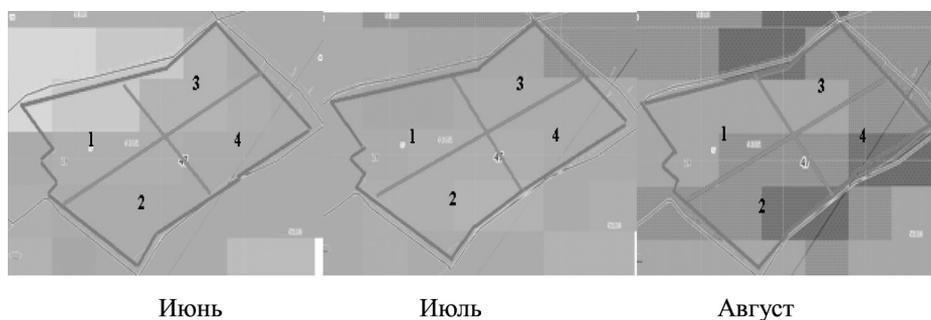


Рис. 6. Изменение состояния растений за вегетационный период на полигоне ЗАО «Осьминское»

Таблица 2

Урожайность сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне ЗАО «Осьминское» в 2014 году

№ п.п.	Тестовый полигон	Сельскохозяйственная культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				Средняя урожайность по полигону
			1	2	3	4	
6	ЗАО «Осьминское»	Многолетние травы	196	206	203	209	206

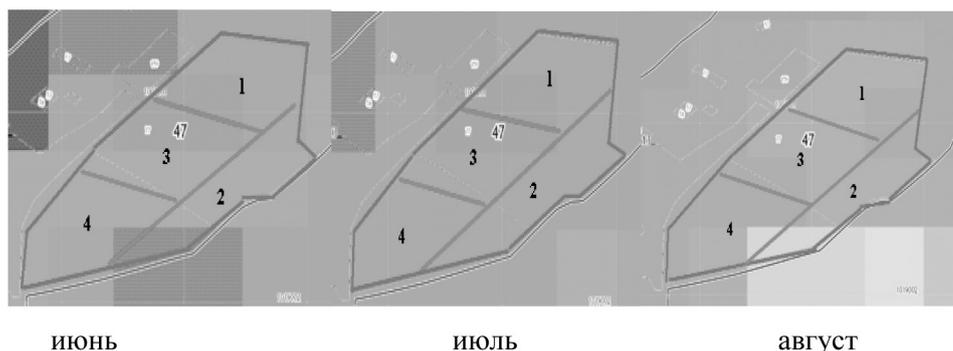


Рис. 7. Изменение состояния растений за вегетационный период на полигоне ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО»

Таблица 3

Урожайность сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне ЗАО «КУЛЬТУРА-АГРО» в 2014 году

№ п.п.	Тестовый полигон	Сельскохозяйственная культура	Урожайность по элементарным участкам, ц/га				Средняя урожайность по полигону
			1	2	3	4	
10	ЗАО «Культура-Агро»	Многолетние травы 4 года	180	178	174	176	177

0,75–0,85 и характеризует большее накопление хлорофилла, биомассы и интенсивность развития трав.

Данные учета урожайности сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне в 2014 году представлены в табл. 3.

Заключение

Совместное рассмотрение и анализ данных таблиц 1–3 показывает целесообразность дифференциации уборки урожая и последующих дифференцированных подкормок в течение вегетационного периода.

Если учесть дифференциацию NDVI показателя на оцениваемых контурах, сопряженную с дифференциацией по урожайности на тех же контурах, и провести оценки пространственного варьирования по формулам (1–4), то возможно показать, что предпринятая пространственная дифференциация уборки урожая и последующих подкормок по пространственному варьированию критерия NDVI на фоне пространственной неоднородности агрометеорологических факторов продуктивности обеспечивает вполне удовлетворительное

подтверждение работоспособности представленных формул. Попытки связать теоретические и практические разработки успешны только тогда, когда они взаимно дополняют друг друга. Поэтому для дальнейшей, более расширенной оценки теоретически достижимого эффекта дифференциации, необходимо более подробно исследовать частично дифференцированный подход планирования агротехнологических решений в системах точного земледелия [5].

Выводы

1. В текущем году предпринята попытка сопоставить данные прямого учета урожайности с дистанционным (на основе космического зондирования) определением величины прогнозируемой урожайности на примере многолетних трав.

2. В процессе выполнения работ на практике было установлено, что характер изменения вегетационного индекса по неоднородности анализируемого пространства полигона позволял определить (спрогнозировать) оптимальный срок уборки по каждому

из элементарных (дифференцированных) участков. Это оказалось особенно важным для своевременной заготовки кормов, поскольку наиболее высокий NDVI-показатель соответствовал наибольшей интенсивности развития растений и, соответственно, предопределял первоочередность уборки именно по этому участку.

3. На основании критериев неоднородности по: почвенным, агроклиматическим, NDVI-индексу развития растений и урожайности на оцениваемых полигонах впервые предпринята попытка произвести оценку состояния территорий с использованием алгоритма геостатистики.

4. Выявлено, что для оценки теоретически достижимого эффекта дифференциации необходимо более подробно исследовать частично дифференцированный подход планирования агротехнологических решений, с учетом геостатистического анализа [6].

Литература

1. Захарян, Ю. Г. Об учете пространственной изменчивости характеристик сельскохозяйственного поля / Захарян Ю.Г., Жуковский Е.Е. // Научн.-техн. бюл. по агрономической физике. – 1983. – № 54. – С. 39–42.
2. Захарян, Ю. Г. Методика выделения технологических контуров полей в системе точного земледелия / Ю.Г. Захарян, И.Б. Усков // Физические, химические и климатические факторы продуктивности полей. – СПб.: АФИ, 2007. – С. 295–305.
3. Комаров, А. А. О мониторинге плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения в условиях Ленинградской области / А.А. Комаров, П.А. Суханов // Известия СПбГАУ. – 2010. – № 21. – С. 11–17.
4. Комаров, А. А. Опыт формирования сети тестовых полигонов для проведения мониторинга состояния почвенного покрова / А.А. Комаров, П.А. Суханов // Мониторинг природных экосистем: Сб. статей. – Пенза, 2009. – С. 159–163.
5. Якушев, В. П. Состояние, задачи и перспективы развития научных основ и технических средств в системе точного земледелия / В.П. Якушев // Машинные технологии производства продукции в системе точного земледелия и животноводства. – М.: ВИМ, 2005. – С. 30–37.
6. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. – М: Мир, 1968. – 408 с.
7. Методические рекомендации по мониторингу и оперативной диагностике физиологического состояния вегетирующих растений. Инструментальный мониторинг водного обмена. Диагностика физиологического состояния растений по оптическим характеристикам листьев / Е.В. Канаш [и др.]. – СПб, 2010. – 36 с.