Перспективы использования геостатистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли

Ю. Г. Захарян, А. А. Комаров

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

Представлены научно-методические подходы использования методов геостатистики и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки состояния полей в условиях неоднородности почвенного покрова. Для этого по спутниковым данным рассчитывался вегетационный индекс NDVI, значения которого согласовывались с данными наземных измерений. Исследования проводились на одном из тестовых полигонов сети региональных мониторинговых исследований в Ленинградской области. Продемонстрировано, что для оценки множественных неоднородных показателей может быть применим геостатистический анализ данных ДЗЗ и использование пространственной дифференциации агротехнологии спутникового мониторинга с целью решения прикладных задач в системе точного земледелия (ТЗ), где предусматривается проведение численных экспериментов с учётом конкретной картированной неоднородности. В то же время в ряде случаев интересующие нас оценки могут быть получены на основе теоретического подхода и представлены в аналитической форме с помощью геостатистики вероятностного математического аппарата с учётом вариабельности почвенно-климатических, геофизических и иных факторов.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, NDVI, геостатистика, вариограммный анализ, пространственная дифференциация, космические снимки

Одобрена к печати: 23.05.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148

Введение

Известно, что при оценке однородного участка (например, залежи) можно получить близкие (точные) показатели, которые идентифицируются в ходе исследований наземных экосистем, растительного и почвенного покрова на космических снимках. Однако в практике сельскохозяйственного производства преимущественно наблюдаются различные неоднородности (почвенно-агрохимические, геофизические, гидрологические, ландшафтные, метеорологические и др.), которые значительно усложняют результаты оценки. На космических снимках различного уровня разрешения эти зоны неоднородности достаточно хорошо проявляются, но трудно идентифицируются. Чем более неоднородным по каким-либо показателям является оцениваемый участок поля, тем в большей степени будет снижаться точность оценки, причём это наблюдается во всех случаях, независимо от метода интерполяции. Показано, что для эффективного выбора дифференцированной агротехнологии на неоднородных по почвенно-климатическим, агрометеорологическим и иным факторам территориях в практике растениеводства могут использоваться адаптации агротехнологических решений к пространственно-временной неоднородности с учётом геостатистического анализа.

Методологические основы

Современная геостатистика — это быстро развивающаяся область прикладной статистики с огромным набором методов: линейных и нелинейных, параметрических и непараметрических моделей, используемых для оценки, анализа, обработки и представления информационных систем дистанционного мониторинга (Лупян и др., 2018). Геостатистический анализ

позволяет значительно повысить уровень надёжности и качество решений, принимаемых на основе использования пространственно-распределённой информации в агропромышленном комплексе. Несмотря на кажущуюся простоту исходных формул, вариография позволяет сделать глубокие выводы о статистической природе данных и структуре адекватных моделей в области сельскохозяйственного производства. В принципе, экспериментальная вариография, основанная на исходных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), может быть использована в большинстве задач пространственной оценки различных неоднородностей полей и возделываемых на них растений.

В случае малого количества измерений и большого количества данных, например карт дистанционного зондирования, в практике растениеводства для оценки может быть применён кригинг. Кригинг и кокригинг позволяют улучшить качество оценки и осуществить переход из области экстраполяции в область интерполяции. Использование дополнительной информации по коррелированным переменным позволяет уменьшить ошибку.

В геостатистике (Гандин, Каган, 1976; Демьянов, Савельева, 2010) при оптимизации агротехнологических решений часто используются нелинейные модели кригинга и индикаторный кригинг, с помощью которого можно рассчитать локальную функцию $Z(x)$, обладающую стационарностью второго порядка для любого вектора h, при этом разность $\{Z(x) - Z(x + h)\}$ имеет конечную вариацию:

$$\mathrm{Var}\left\{Z(x+h)-Z(x)\right\} = E\left\{Z(x+h)-[Z(x)]^2\right\} = 2\gamma(h), \forall x, \quad (1)$$

где E — операция осреднения; $\gamma(h)$ — функция вариограммы распределения в точке оценки. По результатам строятся карты вероятностных средних оценок с заданной вероятностью превышения, используемые для выработки агротехнологических решений в пространственно-временном континууме.

Объекты исследований

Объектом исследований служил тестовый полигон № 1 площадью 28 га (ЗАО «Мельниково»), расположенный в лесной зоне Западно-Европейской провинции Балтийско-Ладожского округа Приозерского района Ленинградской области. Территория полигона размещалась на слабоволнистой местности и имела выраженную ландшафтную, почвенно-агрохимическую и микроклиматическую неоднородность. Динамика только одного из изменчивых показателей (агрохимических свойств почв) в пространстве поля и по годам наблюдений представлена в ранее опубликованных работах (Комаров и др., 2017). При этом было установлено, что весь набор используемых до недавнего времени систем анализа неоднородностей почвенно-растительного покрова не обеспечивал надёжных результатов оценки. С учётом вышеизложенного в наших исследованиях оценка данных ДЗЗ проводилась с применением индекса NDVI, а в качестве инструмента оценки для анализа состояния полей по данным ДЗЗ использовался геостатистический анализ, обладающий функцией $Z(x)$ со стационарностью второго порядка (Isaaks, Srivastava, 1989).

Результаты и обсуждение

При использовании модели пространственной неоднородности характеристик сельскохозяйственного поля необходимо учитывать, что оно представляет собой достаточно сложное природное явление при планировании агротехнологии. Оно состоит из естественного и/или антропогенно-обусловленного варьирования всевозможных почвенных, микроклиматических и иных факторов урожая от точки к точке. Интегральным отражением этой неоднородности является пространственное (внутриполевое) варьирование характеристик состояния поля и в конечном итоге — пространственная дифференциация агротехнического решения на изменчивость урожайности (Жуковский и др., 1986).

Из опыта агрономических наблюдений следует, что пространственную дифференциацию агротехнологии в системе точного земледелия (ТЗ) (Precision..., 2015; Uskov, Zakharian, 2009), неоднородность сельскохозяйственного поля в отношении практически любого агроэкологического фактора F можно интерпретировать как результат наложения трёх разночастотных компонент, обозначаемых в дальнейшем через $m(\vec{r})$, $s(\vec{r})$ и $\varepsilon(\vec{r})$. В соответствии с этим поле значений $f(\vec{r})$ представляется суммой:

$$f(\vec{r}) = m(\vec{r}) + s(\vec{r}) + \varepsilon(\vec{r}).$$

Первая компонента, обозначенная как $m = m(\vec{r})$, отражает низкочастотные пространственные изменения фактора F.

В ряде случаев макронеоднородность поля может обуславливаться определёнными антропогенными причинами. Например, может быть следствием закономерного изменения интенсивности какого-то технологического воздействия в направлении движения сельскохозяйственного агрегата, в частности неравномерности внесения удобрений. Эта компонента отражает неоднородность почвенно-растительного покрова в пространстве поля и отрицательно сказывается на равномерности роста развития растений.

Вторая составляющая в формуле, обозначенная как $s = s(\vec{r})$, описывает изменчивость фактора F. Считается, что мезокомпонента $s(\vec{r})$ имеет достаточно сложную пространственную структуру и в отличие от макрокомпоненты $m(\vec{r})$ её невозможно описать никакой детерминированной зависимостью приемлемого уровня сложности.

Наиболее адекватное математическое описание мезокомпоненты $s(\vec{r})$ может быть дано с использованием моделей, разрабатываемых в теории случайных функций и геостатистики. А именно: меняясь от точки к точке, поле $s(\vec{r})$ сохраняет некоторые важные свойства своей статистической структуры. В частности, её ковариационная функция, определяемая путём пространственного осреднения парных произведений $s(\vec{r}_1)\cdot s(\vec{r}_2)$, зависит только от вектора-разности $\vec{h} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ и не зависит от каждого из векторов $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ в отдельности. Последнее может описывать неоднородность пространства поля во времени (сезонные и годовые флуктуации). Наложение всех компонент в одной размерности поля позволяет не только визуализировать его изменчивое состояние, но и выбрать на основании анализа оптимальное решение, например произвести своевременную уборку урожая, подкормку удобрениями и биопрепаратами и иные агротехнологические решения, как это представлено в работе (Захарян, 2018).

Описанная трёхкомпонентная модель имеет в основном феноменологическое значение, позволяя яснее представить природу пространственной неоднородности сельскохозяйственного поля и исходя из этого более чётко интерпретировать результаты соответствующего анализа в практике растениеводства. Разумеется, всегда приходится иметь дело не с отдельными компонентами, а суммарной неоднородностью, которая и должна учитываться при обосновании технологий точного земледелия (Якушев, 2016).

Основная идея такого подхода в практике растениеводства состоит в том, что при выполнении упоминавшейся выше гипотезы стационарности статистическая структура поля пространственно-распределённого фактора F может быть описана с помощью так называемой вариограммной функции $\gamma(\vec{h})$, которая определяется как половина среднего в статистическом смысле квадрата разности значений фактора F в точках на расстоянии $\vec{h}$ друг от друга. В исследованиях сдвиг $\vec{h}$ часто называют лагом (Якушев, 2016) или рангом вариограммы. Согласно такому определению:

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

Решения большинства задач в системе точного земледелия, основанные на использовании вариограммного анализа, в частности классическая проблема кригинга, логически связаны с ранее использованным и разработанным объективным анализом. В свою очередь, они требуют, чтобы эмпирические оценки вариограммы γ при переходе от среднего условия варьирующего фактора на конкретные данные зондирования рассчитывались первоначально

для конечного набора показателей $h = h_1, h_2, ..., h_k$. На этом основании после соответствующей разработки полученные данные ДЗЗ были затем аппроксимированы определённой аналитической зависимостью.

С учётом фундаментальных свойств вариограммной функции (2) можно сформулировать определённые требования, которым должна удовлетворять такая аппроксимация. Для экспоненциальной модели:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } h = 0, \\ C_0 + C_1\left[1 - \exp\left(\dfrac{-sh}{a}\right)\right] & \text{при } h > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициенты C_0 и C_1 в этой формуле имеют смысл приближённых значений (эмпирических оценок) знакомых дисперсий D_ε и D_s, характеризующих соответственно микро- и мезомасштабную вариабельность рассматриваемого фактора F; a — расстояние между точками, на котором вариационная функция практически достигает уровня плато $C = C_0 + C_1$. В работах по геостатистике параметр a часто называют лагом или рангом вариограммы. По аналогии с коэффициентами C_0 и C_1 суммарная величина $C = C_0 + C_1$ может рассматриваться как приближённое значение (оценка) общей мезо- и микромасштабной дисперсии пространственного варьирования фактора F. В соответствии с такой интерпретацией $C \approx D = D_\varepsilon + D_s$.

В заключение отметим, что на сегодняшний день существует достаточно большое число прикладных геостатистических пакетов, которые позволяют обрабатывать экспериментальные данные по двумерным и трёхмерным полям, выделять тренды и подбирать соответствующие аппроксимационные зависимости, проводить пространственное сглаживание и осреднение, осуществлять автоматизированное картирование и т. д. К сожалению, значительная часть этого программного обеспечения довольно сложна и ориентирована на использование высококвалифицированными специалистами. Приемлемой альтернативой может служить прикладной пакет VARIOWIN, рабочая версия которого снабжена руководством пользователя и пояснительными примерами. Пакет существует в свободном доступе в интернете (A Web Resource for Geostatistics and Spatial Statistics, http://www.ai-geostats.org./index.php.id=112).

Для эффективного применения агротехнологии на неоднородных территориях по оцениваемым факторам в практике растениеводства используют пространственно-дифференцированное планирование, где предусматривается проведение численных экспериментов над конкретной картированной неоднородностью. В то же время в ряде случаев интересующие нас оценки могут быть получены на основе теоретического подхода и представлены в аналитической форме с помощью вероятностного математического аппарата с учётом вариабельности почвенно-климатических факторов.

В качестве критериев дифференциации агротехнологии использована тестовая площадка дистанционного зондирования по одному из полигонов, размещённых в сети тестовых полигонов Ленинградской области. Для идентификации признаков формируется специфическая шкала с оценёнными значениями вегетационного индекса.

На основании исследований было оценено значительное варьирование вегетационного индекса как по территории поля, так и за период вегетации. Так, вегетационный индекс варьировал по элементарным участкам поля (характеризуя пространственную неоднородность), а также в динамике вегетационного сезона (характеризуя временную неоднородность в развитии растительного покрова). При этом возрастание вегетационного индекса характеризовало большое накопление хлорофилла, биомассы и интенсивность развития растений. Именно этот показатель является определяющим для производственной оценки уборки урожая. На основании использования инструмента геостатистики были выбраны оптимальные сроки уборки урожая, обеспечивающие получение качественной продукции. Данные учёта урожайности сельскохозяйственных культур на тестовом полигоне представлены в *таблице*. Ранее опубликованные материалы (Комаров и др., 2017) отображают результаты использования сопряжённых данных дистанционного и наземного зондирования при оценке состояния растительного покрова на том же полигоне, но без применения геостатистики и соответствующей коррекции и оптимизации уборки урожая.

Оценка динамики состояния растений с помощью вегетационного индекса

Сравнительная оценка двух смежных снимков на *рис. 1–5* позволяет даже визуально отметить различия вегетационного индекса как по элементарным участкам полигона, так и по годам оценки. На снимке 2016 г. (см. *рис. 1*) низкий показатель NDVI (0,42–0,58) в начале вегетации связан с посадкой картофеля на участках № 1–2, а на снимке 2017 г. на этих же участках отмечается интенсивная вегетация многолетних трав.

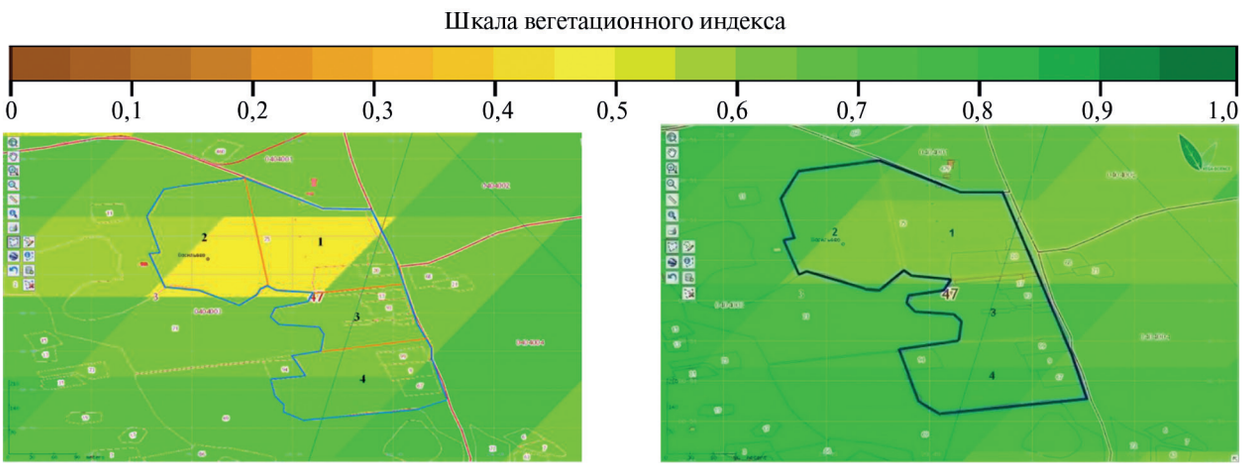

Рис. 1. Состояние растительного покрова: *слева* — на май 2016 г.; *справа* — на май 2017 г.

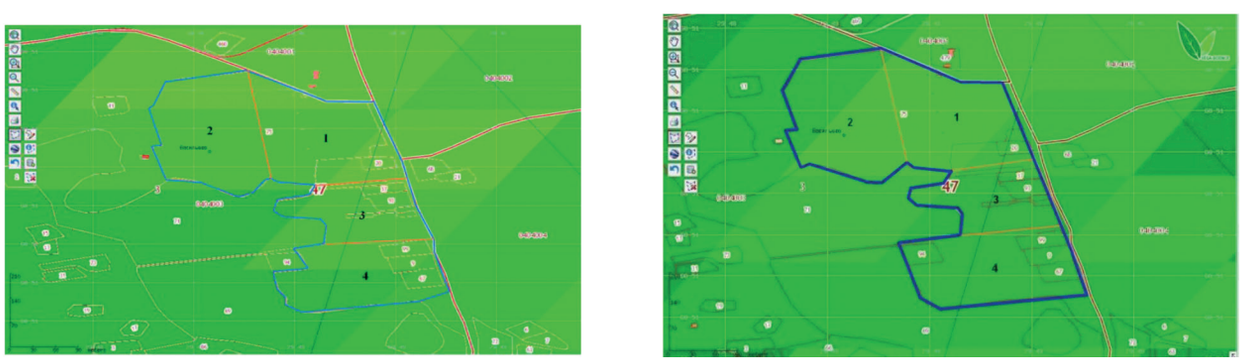

Рис. 2. Состояние растительного покрова: *слева* — на июнь 2016 г.; *справа* — на июнь 2017 г.

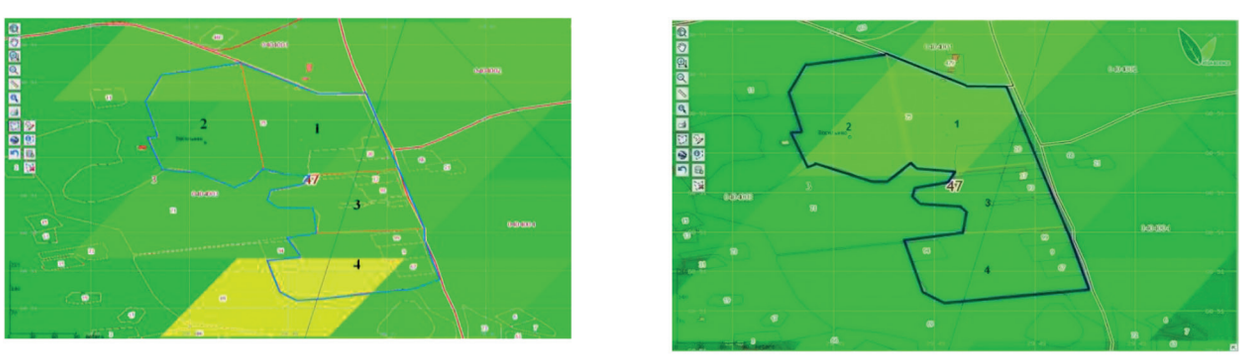

Рис. 3. Состояние растительного покрова: *слева* — на июль 2016 г.; *справа* — на июль 2017 г.

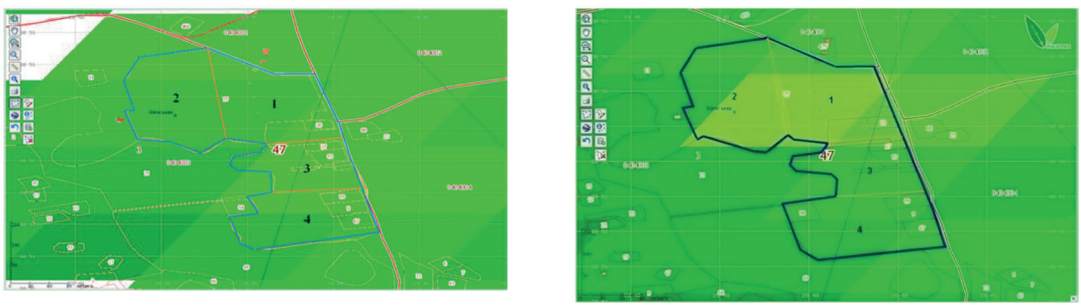

Рис. 4. Состояние растительного покрова: *слева* — на август 2016 г.; *справа* — на август 2017 г.

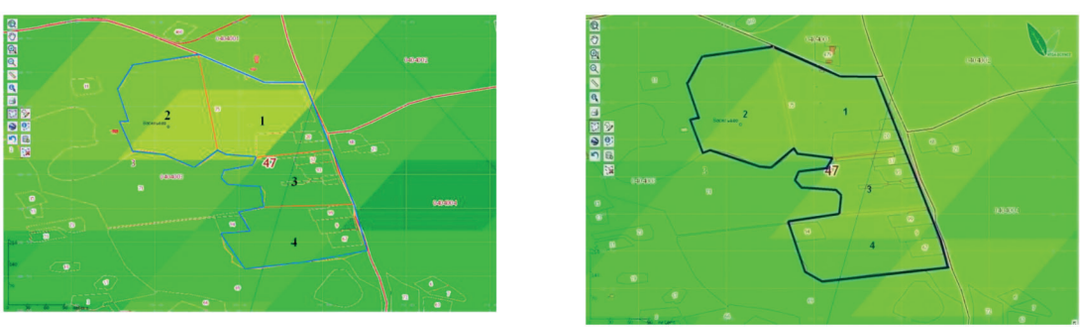

Рис. 5. Состояние растительного покрова: *слева* — на сентябрь 2016 г.; *справа* — на сентябрь 2017 г.

Характеристика растительного покрова в условиях 2016 г. изменялась с постепенным нарастанием вегетационного индекса на участках № 1–3 с мая по август. Однако если для участков № 1–2 (картофель) к сентябрю отмечено снижение вегетационного индекса до 0,52–0,64, что характеризовало уменьшение накопления биомассы растений (ботвы) и отток питательных элементов в клубни, то для участка № 3 (старовозрастной травостой) продолжалась активная вегетация (см. *рис. 5*).

После проведения первого укоса на элементарных участках с многолетними травами в 2017 г. отмечается более интенсивное отрастание травы, чем в 2016 г. (см. *рис. 2*).

Оптимизация условий уборки (укосов) многолетних трав отчётливо проявилась в условиях 2016 г. Так, одноукосная уборка урожая обеспечила получение 234 ц/га зелёной массы растений (участок № 3), тогда как двухукосная (участок № 4) — до 395 ц/га, или больше на 68 % (см. *рис. 4*).

Таким образом, на основании анализа показателей 2016 г. была продемонстрирована перспектива программы перехода на двухукосное использование кормовых культур. В условиях 2017 г. был реализован переход к двухукосному использованию травостоя, что обеспечило существенное повышение урожайности (см. *таблицу*). Символом «*» отмечен период уборки урожая (для многолетних трав — укосы). Если учесть дифференциацию NDVI-показателя на оцениваемых контурах, сопряжённую с дифференциацией по урожайности на тех же контурах, и провести оценку пространственного варьирования по формулам, то можно показать, что предпринятая пространственная дифференциация уборки урожая с использованием геостатистики в системе ТЗ (Geostatistical..., 2010; Journel, Huijbregts, 1978) и последующих подкормок по пространственному варьированию критерия NDVI на фоне пространственной неоднородности оцениваемых 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 подробнее исследовать частично дифференцированный подход планирования агротехнологических решений в системах ТЗ.

Урожайность культур и варьирование индекса NDVI по элементарным участкам поля и во времени оценки показателей

Год	Месяц	Элементарные участки			
		1	2	3	4
2016	май	0,42–0,58	0,45–0,60	0,60–0,65	0,65–0,68
	июнь	0,62–0,68	0,64–0,70	0,65–0,72	0,70–0,77*
	июль	0,66–0,80	0,66–0,86	0,72–0,76	0,45–0,66
	август	0,72–0,77	0,73–0,78	0,73–0,75	**0,72–0,80***
	сентябрь	**0,52–0,64***	**0,50–0,57***	**0,74–0,78***	0,68–0,75
Урожайность, ц/га		131 картофель	136 картофель	234 многолетние травы один укос	278+118 многолетние травы два укоса
2017	май	0,64–0,70	0,64–0,76	0,65–0,80	0,70–0,82
	июнь	0,65–0,75	**0,68–0,82***	**0,78–0,85***	**0,82–0,85***
	июль	**0,65–0,75***	0,65–0,80	0,75–0,83	0,80–0,85
	август	0,58–0,65	**0,57–0,80***	**0,75–0,81***	**0,80–0,83***
	сентябрь	**0,61–0,65***	0,60–0,70	0,60–0,62	0,61–0,67
Урожай (многолетние травы), ц/га		178+104 два укоса	185+109 два укоса	286+115 два укоса	310+122 два укоса

Заключение

В заключение следует отметить, что в методическом плане рассмотренная задача обладает некоторой общностью. Во-первых, во всех случаях показано, что при моделировании пространственной дифференциации хозяйственное планирование по климатическим и почвенным факторам на неоднородной сельскохозяйственной территории может рассматриваться с позиции теории геостатистических решений. Во-вторых, описанные модели позволяют яснее представить природу пространственной неоднородности сельскохозяйственного поля и исходя из этого более чётко интерпретировать результаты соответствующего геостатического анализа.

Для обеспечения высокоэффективного точного управления необходимо располагать сведениями о вариограммной функции и пространственной структуре управляемых критериев, об основных тенденциях и трендах наблюдаемых пространственных изменений статистической связности (коррелированности) значений варьирующих показателей.

На основании критерия неоднородности по почвенным, агроклиматическим факторам, индексу развития растений и урожайности NDVI впервые предпринята попытка произвести оценку состояния территорий с использованием алгоритма геостатистики с применением ДЗЗ.

Литература

1. *Гандин Л. С.*, *Каган Р. Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 360 с.
2. *Демьянов В. В.*, *Савельева Е. А.* Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
3. *Захарян Ю. Г.* Оценка эффективности адаптации агротехнологических решений к пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных земель: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2018. 51 с.
4. *Комаров А. А.*, *Захарян Ю. Г.*, *Кирсанов А. Д.* Анализ пространственных распределений урожайности для обоснования дифференциации агротехнологии // Известия Санкт-Петербургского аграрного ун-та. 2017. № 47. С. 48–57.

5. *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.
6. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
7. Geostatistical applications for precision agriculture / ed. Oliver M. A. Springer Science and Business Media, 2010. 331 p.
8. *Isaaks E. H.*, *Srivastava R. M.* Applied Geostatistics. Oxford University Press, 1989. 589 p.
9. *Journel A. G.*, *Huijbregts Ch. J.* Mining Geostatistics. L.; N. Y.: Academic Press, 1978. 600 p.
10. Precision agriculture technology for group farming / ed. Zhang Q. CRC Press, 2015. 360 p.
11. *Uskov A. O.*, *Zakharian J. G.* Expedient spatial differentiation of technologies of precise agriculture according to productivity factors // JIAC 2009. Book of abstr. Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2009. P. 113.

Prospects for geostatistics application for analyzing plant state on the basis of remote sensing data

Yu. G. Zakharyan, A. A. Komarov

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

The paper presents scientific and methodological approaches for the application of geostatistics methods and remote sensing data to assess the state of agricultural fields characterized by soil cover heterogeneity. The calculation of the NDVI vegetation index was based on the satellite data. The obtained NDVI values were coordinated with ground measurements. The studies were conducted at the test site of the regional monitoring network in Leningrad Region. It was shown that geostatistical analysis of remote sensing data and the use of spatial differentiation of agricultural technology of satellite monitoring can be used to assess multiple heterogeneous indicators. In some cases, the required assessment can be obtained based on a theoretical approach and presented in analytical form using geostatistics probabilistic mathematical apparatus taking into account the variability of soil-climatic and other factors.

Keywords: remote sensing data, NDVI, geostatistics, variogram analysis, spatial differentiation, space images

Accepted: 23.05.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148

References

1. Gandin L. S. Kagan R. L., *Statisticheskie metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh* (Statistical methods for the interpretation of meteorological data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 360 p.
2. Demyanov V. V., Savelieva E. A., *Geostatistika: teoriya i praktika* (Geostatistics: theory and practice), Moscow: Science, 2010, 327 p.
3. Zakharyan Y. G., *Otsenka effektivnosti adaptatsii agrotekhnologicheskikh resheniy k prostranstvenno-vremennoi neodnorodnosti sel'skokhozyaistvennykh zemel': Avtoref. diss. dokt. s.-kh. nauk* (Assessment of the effectiveness of the agrotechnological solutions adaptation to the spatial and temporal heterogeneity of agricultural land: Ext. abstract Doct. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2018, 51 p.
4. Komarov A. A., Zakharyan Yu. G., Kirsanov A. D., Analiz prostranstvennykh raspredeleniy urozhaynosti dlya obosnovaniya differentsiatsii agrotekhnologii (Analysis of the spatial distribution of yield to substantiate the differentiation of agrotechnology), *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo agrarnogo universiteta*, 2017, No. 47, pp. 48–57.

5. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Razvitie podkhodov k postroeniyu informatsionnykh system distantsionnogo monitoringa (Evolution of remote monitoring information systems development concepts), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
6. *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika* (Precision agriculture: theory and practice), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2016, 364 p.
7. *Geostatistical applications for precision agriculture*, Oliver M. A. (ed.), Springer Science and Business Media, 2010, 331 p.
8. Isaaks N., Shrivastava R. M., *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, 1989, 589 p.
9. Journel A. G., Huijbregts Ch. J., *Mining Geostatistics*, London and New York (Academic Press), 1978, 600 p.
10. *Precision agriculture technology for group farming*, Zhang Q. (ed.), CRC Press, 2015, 360 p.
11. Uskov A. O., Zakharyan J. G., Expedient spatial differentiation of technologies of precise agriculture according to productivity factors, *JIAC 2009*, Book of abstracts, Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2009, p. 113.