
LANDSCAPE ECOLOGY

УДК 595.142.3

А. В. Жуков¹, д-р биол. наук, доц.,
О. Н. Кунах², канд. биол. наук, доц.,
Г. А. Задорожная¹, канд. биол. наук, доц.,
Е. В. Андрусевич¹

¹Днепропетровский государственный аграрный университет

²Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ЛАНДШАФТНАЯ ЭКОЛОГИЯ КАК ОСНОВА ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЦЕНОЗОВ

A. V. Zhukov¹, Dr. Sci. (Biol.), Assoc. Prof.,
O. N. Kunah², Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof.,
G. A. Zadorozhnaja¹, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof.,
E. V. Andrusевич¹

¹Dnipropetrovsk State Agrarian University

²Oles Honchar Dnipropetrovsk National University

LANDSCAPE ECOLOGY AS A BASIS OF THE SPATIAL ANALYSIS OF AGROCOENOSIS PRODUCTIVITY

The conception of the elementary landscape processes has been applied as keystone paradigm in investigation of agriculture production in space in time. The combination of field information collection with remote sensing data has been shown as synergic effect method to explain landscape level variation of phytomass.

There are two approaches to points sampling interpolation in digital cartography. The first one is based on territorial autocorrelation model. The second one is based on soil-landscape connection. According to the first approach modeled property value in point may be predicted by means of autocorrelation function.

A considerable density of the sampling points has to be reached for geostatistic modeling. Land biomass estimation is necessary to study production, carbon turnover, nutrient distribution in terrestrial ecosystems. Remote sensing data propose opportunity for properties estimation in annual dynamic on the different spatial levels. The application of the concept of landscape ecology and data of remote sensing of the earth has allowed to estimate spatio-temporal dynamics of an agrocoenosis vegetative cover. Investigation has been carried out in 2012.

Plant biomass production process following vegetation period of the two neighborhood fields have been studied. Fields are distinguished by the agriculture practices. Organic agriculture applied in the one field and intensive agriculture applied in another. Landsat derived NDVI index has been used as measure of phytomass in the fields. The factor effecting on spatial heterogeneity of phytomass has been shown as impotent issue to understand yield formation mechanisms. Obtained information analysis process has been divided into to main phase: statistical and geostatistical. Statistical approach lets to compare NDVI variability in time taking in consideration two fields as a hole objects. Fields have been found as characterized by similar total temporal vegetation dynamics.

ANOVA revealed that NDVI values are considerable different in the two fields studied. Geostatistic analysis lets to compare NDVI spatial patterns within both fields. It is established that the

major feature of spatial variability of phytomass in agrocoenosis at natural and conventional systems of agriculture is the increase in a role of a trend and local autocorrelation at seasonal increase in phytomass which is displayed by means of NDVI.

These results are an obvious spatial consequence the Libich law of limiting factor. With increase in phytomass in the course of vegetation factors of the various nature and different scale level in a most degrees make the limiting impact. Studying the nature of factors which define a spatial trend and local autocorrelation is perspective. As a hypothesis it is possible to come out with an assumption, that the general trend of variability of phytomass is defined by relief, and local variability of edaphic properties is defined by spatial autocorrelation.

Keywords: landscape ecology, remote sensing, vegetative index.

**А. В. Жуков¹, д-р биол. наук, доц.,
О. Н. Кунах², канд. биол. наук, доц.,
Г. А. Задорожная¹, канд. биол. наук, доц.,
Е. В. Андруевич¹**

¹*Днепропетровский государственный аграрный университет*

²*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

ЛАНДШАФТНАЯ ЭКОЛОГИЯ КАК ОСНОВА ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЦЕНОЗОВ

Применение концепции ландшафтной экологии и данных дистанционного зондирования земли позволило оценить пространственно-временную динамику растительного покрова агроценозов. Установлено, что важнейшей особенностью пространственной изменчивости фитомассы в агроценозах при природной и традиционной системах земледелия является увеличение роли тренда и локальной автокорреляции при сезонном увеличении фитомассы, которое индицируется с помощью NDVI. Данный результат является очевидным пространственным следствием закона лимитирующего фактора Либиха. С увеличением фитомассы в процессе вегетации факторы различной природы и различного масштабного уровня все в большей степени оказывают свое ограничивающее влияние. Перспективным является изучение природы факторов, которые определяют пространственный тренд и локальную автокорреляцию. В качестве гипотезы можно высказать предположение, что рельеф местности определяет общий тренд изменчивости фитомассы, а локальная вариабельность эдафических свойств – пространственную автокорреляцию.

Ключевые слова: ландшафтная экология, дистанционное зондирование земли, вегетационный индекс.

**О. В. Жуков¹, д-р біол. наук, доц.,
О. М. Кунах², канд. біол. наук, доц.,
Г. О. Задорожна¹, канд. біол. наук, доц.,
К. В. Андруевич¹**

¹*Дніпропетровський державний аграрний університет*

²*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара*

ЛАНДШАФТНА ЕКОЛОГІЯ ЯК ОСНОВА ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ПРОДУКТИВНОСТІ АГРОЦЕНОЗІВ

Застосування концепції ландшафтно́ї екології й даних дистанційного зондування землі дозволило оцінити просторово-часову динаміку рослинного покриву агроценозів. Установлено, що найважливішою особливістю просторової мінливості фітомаси в агроценозах при природній і традиційній системах землеробства є збільшення ролі тренда й локальної автокореляції при сезонному збільшенні фітомаси, що індикується за допомогою NDVI. Даний результат є очевидним просторовим наслідком закону лімітуючого фактора Лібиха. Зі збільшенням фітомаси в процесі вегетації фактори різної природи й різного масштабного рівня все більшою мірою здійснюють свій обмежуючий вплив. Перспективним є вивчення природи факторів, які

визначають просторовий тренд і локальну автокореляцію. У якості гіпотези можна висловити припущення, що рельєф місцевості визначає загальний тренд мінливості фітомаси, а локальна варіабельність едафічних властивостей – просторову автокореляцію.

Ключові слова: ландшафтна екологія, дистанційне зондування землі, вегетаційний індекс.

Ядром современного ландшафтоведения как естественной науки о земле является исследование правил межкомпонентных отношений в пространстве-времени (Хорошев, 2006). Концепцию об элементарных почвенных процессах, которая в своей основе сформулирована И. П. Герасимовым и М. А. Глазовской (1960) и более широко развита Ф. И. Козловским (2003) в виде представления о ландшафтных или геосистемных элементарных процессах, можно рассматривать как подход к естественной для натуралиста редукции системы до ее независимых оснований или частей (Пузаченко, 2006).

Как отмечают Д. Н. Козлов (2008), возможности исследования существенно расширяются при сочетании наземных полевых измерений и дистанционной информации. Последняя рассматривается не как средство для дешифрирования априори существующих образов состояния земной поверхности, а как система измерения ее физических свойств через величины отраженной солнечной радиации в различных спектральных зонах.

Наряду с дистанционной информацией естественно рассматривать цифровые модели рельефа, потенциально отражающие пространственное перераспределение тепла, твердого и жидкого стока (Козлов, 2008).

Преобразование солнечной энергии, представленное через спектрозональные дистанционные измерения, можно трактовать как интегральный ландшафтный процесс. Задача исследования – расчленив его на элементарные ландшафтные процессы в понимании их Ф. И. Козловским (2003). Элементарный процесс – есть методологический прием представления динамики сложной реальной системы, данной наблюдателю в совокупности наблюдаемых или измеримых переменных, а функциональное пространство – есть модель явления в пространстве физически осмысленных материальных тел или сил. При этом мы рассчитываем, что первое есть в конечном итоге отображение второго (Пузаченко, 2006).

При исследовании на этой основе ландшафтообразующих факторов возможны два основных подхода (Козлов, 2006, 2008). Первый – интегральный, при котором дистанционным спектрозональным измерениям и свойствам рельефа ставятся в соответствие некоторые классы состояний какой-либо типологической классификации компонента (например, группы ассоциаций растительности, виды почв и т.п.). Второй – редукционистский (парциальный), при котором рассматриваются элементарные измеримые свойства каждого компонента (например, высота леса, доля участия конкретного вида в растительном покрове или какие-либо характеристики его обилия, мощность гумусового горизонта, влажность почвы на определенной глубине и т.п.). Эти два подхода не противоречат друг другу и, в конечном итоге, на их основе необходимо получить отображение состояний в пространстве одних и тех же ландшафтных процессов. Более того, в качестве гипотезы можно принять, что если на основе этих двух подходов получены одинаковые отображения, то в системе не обнаружены эмерджентные свойства.

Подход, предложенный в работе Д. Н. Козлова и соавт. (2008), фактически сводится к схеме черного ящика с явно определенным входом: потоком солнечной радиации, неявно определенным приходом атмосферных осадков, формой земной поверхности как некоторой константы в каждой точке и явно измеренным выходом – результатом функционирования ландшафта, отраженной солнечной радиацией и тепловым излучением. Подразумевается, что рельеф перераспределяет приходящую влагу и энергию на различных иерархических уровнях. Отраженная солнечная радиация представляется через значения в спектральных каналах, через различия отражения в разных

зонах спектров и через индексы, рассчитываемые на основе представлений термодинамики. Полевые измерения свойств компонентов ландшафта дают основу для раскрытия структуры черного ящика как механизма, обеспечивающего преобразование энергии через испарение, рассеивание тепла и биохимические процессы. Соответственно, воспроизводимость состояний любого явления возможна постольку, поскольку оно участвует в преобразовании тепла и влаги. Свойства, прямо или косвенно не связанные с этими процессами, если и наблюдаемы в поле, то не воспроизводимы в рассматриваемой системе отношений. Если принять, что трансформация тепла и влаги – важнейшая функция ландшафта, то рассмотренный подход вполне адекватен. Однако, как отмечают авторы концепции, он все-таки не исчерпывает многообразия природы. Можно не сомневаться, что существуют и иные входы в «черный ящик» и иные выходы, оставшиеся за границей наблюдаемого. В анализ может быть включен один очевидный вход: воздействие ветра, скорость и направление которого является продуктом взаимодействия воздушных масс и градиентов давления, генерируемых на различных иерархических уровнях организации ландшафта (Козлов, 2008).

Как в традиционной, так и в цифровой картографии, по содержанию и назначению все почвенные карты могут быть разделены на две группы – базовые и специальные (Фридланд, 1984; Козлов, 2011). Первая группа связана с научными и практическими задачами, требующими выделения на карте дискретных ареалов единиц генетической или прикладных классификаций почв. Вторая группа – преимущественно карты отдельных свойств, предназначенные для решения задач узкопрактического назначения (обеспеченность элементами питания, оценка актуальной кислотности и щелочности, загрязнение тяжелыми металлами, засоление, влажность и температура почвы и др.) (Козлов, 2011).

Д. Н. Козлов и Н. П. Сорокина (2011) отмечают, что основная методическая проблема почвенной картографии связана с невозможностью прямой инвентаризации ареалов почв и почвенных комбинаций. Закономерности их пространственной организации выявляются по доступным для наблюдения свойствам факторов дифференциации ПП: рельефа, климата, почвообразующих пород, живых организмов, хозяйственной деятельности, пространственного положения.

В цифровой почвенной картографии для интерполяции результатов точечного опробования распространены два взаимодополняющих подхода (McBratney, 2003; Козлов, 2011). Первый основан на модели территориальной автокорреляции (геостатистики или пространственной статистики), второй – на модели почвенно-ландшафтных связей. Согласно первому подходу, значение моделируемого свойства почвы в конкретной точке может быть предсказано (интерполировано) на основе автокорреляционной функции, учитывающей значения этого свойства в некоторой окрестности этой точки. Геостатистическое моделирование требует высокой плотности полевого опробования. Это делает экономически нецелесообразным его использование при детальном картографировании больших территорий. Помимо этого, предполагается стационарность пространственного распределения результатов опробования, что накладывает существенные ограничения при картировании неоднородного почвенного покрова. Вместе с тем использование данного подхода оправдано для отображения специальных почвенных показателей в пределах агропроизводственных участков, не имеющих выраженных почвенно-ландшафтных связей (например, содержание в гумусовом горизонте элементов биофильной группы). Параметры автокорреляционной функции используются для определения характерных масштабов пространственного варьирования почвенного покрова и выявления средних размеров почвенного индивидуума (Козловский, 1970; Кузякова, 2006; Самсонова, 2008; Козлов, 2011).

Технологическую основу цифровой модели почвенно-ландшафтных связей (второй подход) составляет растровая модель измерения факторно-индикационных характеристик, имеющих сплошной охват территории картографирования (рис. 1).

Элементы регулярной сетки (пиксели, операционные или элементарные территориальные единицы – ЭТЕ) с обоснованными линейными размерами служат посредниками между точечными данными полевых почвенных описаний и площадными ландшафтно-индикационными характеристиками. Элементы, в пределах которых имеются почвенные описания, определяют обучающую выборку, на которой строятся вероятностно-статистические модели, связывающие изменчивость почвенных свойств, выявленную в ходе опробования, с изменчивостью свойств факторов почвообразования. В случае достоверности такой модели становится возможным предсказать значение моделируемого почвенного свойства для не обеспеченных полевым опробованием пикселей и дать оценку точности такого прогноза (Козлов, 2011).

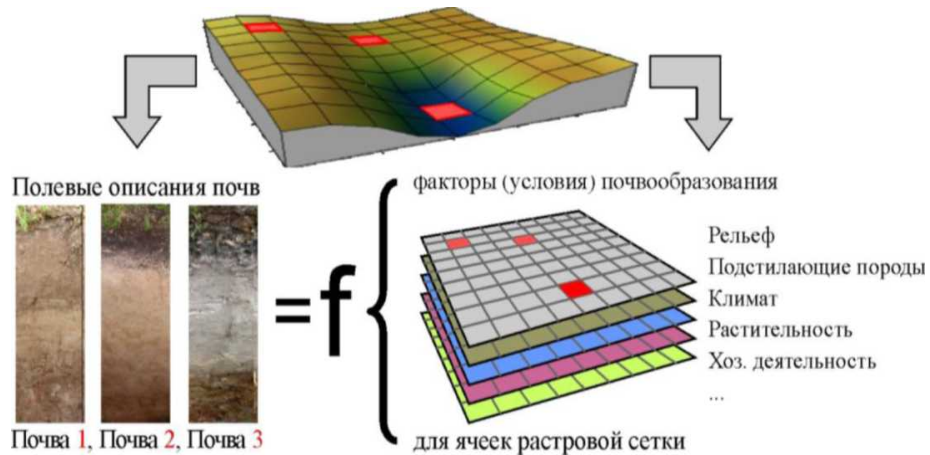


Рис. 1. Принципиальная схема цифрового почвенного картографирования на основе факторно-корреляционной модели почвенно-ландшафтных связей (по Козлову, 2011)

В качестве средств построения ландшафтно-индикационной модели используются методы множественной регрессии, дискриминантного и корреляционного анализа, их модификации, позволяющие вычислить вес каждой индикационной переменной в разделении заданных почвенных категорий и сопоставить каждому сочетанию факторных основ определенное состояние почвы. Методы интеллектуального анализа данных (англ. *data mining*: нейронные сети, классификационные и регрессионные деревья и др.) обеспечивают выявление скрытых закономерностей или взаимосвязей в больших массивах данных (Козлов, 2011).

В качестве факторно-индикационных характеристик элементов растровой сетки чаще всего используются значения абсолютных высот и производные морфометрические параметры рельефа, описывающие перераспределение влаги и тепла – показатели крутизны и формы поверхности, водосборная площадь, высота над местным базисом эрозии и др. (Шарый, 2006; Козлов, 2011). Для характеристики растительности, особенностей хозяйственной деятельности как почвообразующих факторов используются многозональные оптико-электронные космические снимки различных систем (Landsat, Spot, Aster и др.), регистрирующих свойства ландшафтного покрова (биомасса, продуктивность, температура и др.) в величинах отраженного коротковолнового и собственного длинноволнового излучения (Ormesì, 2008; Козлов, 2011).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

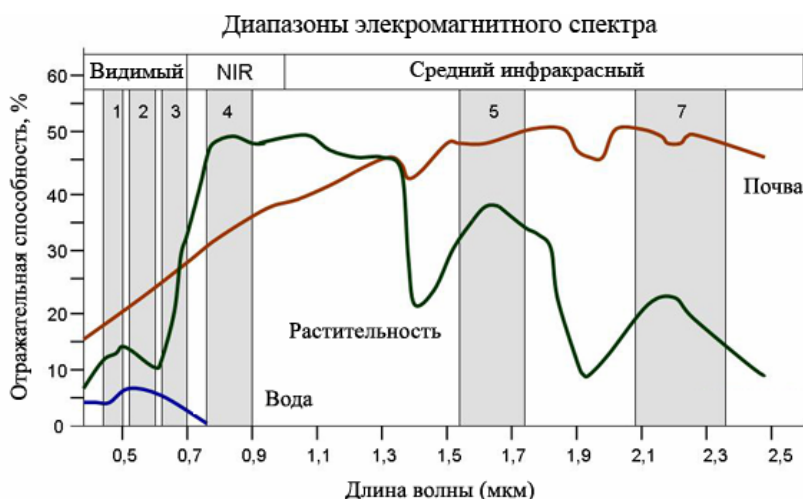
Исследования проведены в 2012 году. Два смежных поля расположены на расстоянии 5 км на север от г. Синельниково (Днепропетровской области). На одном поле (находится восточней) с 2008 г. в практике сельскохозяйственного производства

отказались от применения пестицидов и минеральных удобрений. Борьба с сорняками на этом поле ведется с помощью ручной прополки. Такую систему земледелия можно отнести к так называемому природному земледелию. Соседнее поле возделывается по интенсивной технологии с применением пестицидов и минеральных удобрений. На обоих полях в 2012 г. возделывался семенной подсолнечник.

На поле, которое впоследствии переведено в режим природного земледелия, в 2008 году возделывалась озимая пшеница Фаворитка и вносились аммиачная селитра (185 кг/га), аммофос (146 кг/га), инсектицид актара (12 г/га), гербицид Альфа-стар (20 г/га), фунгицид Альфа-стандарт (Дерозал) – 320 г/га, семена обрабатывались протравителем Дивидент Стар (1 л/тону). В 2009 году на поле выращивался горох семенной Харьковский эталонный. Вносились для борьбы с сорняками – Базагран (2,5 л/га), инсектицид Диазол (инсектицид 0,6 л/га), СуперБизон (0,56 л/га), гербицид Физилад Форте. Получен урожай гороха 22 ц/га. В 2010 г. на поле выращивалось тритикале Папсуевское без применения средств химзащиты и удобрений. Получен урожай 41,3 ц/га. В 2011 году выращивалась соя семенная (12 га), тритикале (17 га), кукуруза гибрид Солонянский 298 СВ (ФАО 290) (28 га) без применения пестицидов и удобрений. Получен урожай сои 20 ц/га, тритикале – 39,6 ц/га, кукурузы – 38,9 ц/га. В 2012 году на поле выращивался подсолнечник семенной Сингента. Получена урожайность 7 ц/га.

Развитие многоканальной космической съемки и технологий построения трехмерных моделей рельефа создают новые возможности для исследования связей видов с условиями среды и оценки качества местообитаний (Пузаченко и др., 2008). В настоящей работе использованы материалы с расширенного тематического картографического сканера (*Enhanced Thematic Mapper Plus* – ETM+), установленного на спутнике Landsat 7 (<http://glcf.umd.edu/data>).

Мультиспектральные сканеры спутников Landsat позволяют оценить величину отраженной радиации в полосе длин волн 450 – 2350 нм с пространственным разрешением 28,5×28,5 м на местности (съемочные каналы 1 – 5, 7) и температурным шестым каналом 10120 – 14500 нм с разрешением 57×57 м (шестой съемочный канал), охватывая большую часть спектра солнечной радиации. Съемка осуществляется в семи спектральных диапазонах (каналах) (условные обозначения – B1–B7), соответствующих основным окнам прозрачности атмосферы, что обеспечивает оптимальное отображение энергетических характеристик для волн, длина которых соответствует максимальному восприятию деятельной поверхностью (рис. 2).



Условные обозначения: NIR – ближний инфракрасный диапазон.

Рис. 2. Кривые спектральной яркости основных классов наземных объектов.
Полосы обозначают участки спектра, соответствующие съемочным зонам Landsat

Наряду с прямыми значениями каналов Landsat свойства среды селективно отражаются через их соотношения (индексы) (Moreno et al., 1999).

Наиболее известный из индексов – нормализованный разностный вегетационный индекс (*Normalized Difference Vegetation Index* – *NDVI*): $NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$ – чувствителен к наличию растительности на земной поверхности и может быть использован для определения ее типа, количества и состояния. Высокая корреляция этого индекса с величиной чистой биологической продуктивности (NPP) определила использование этого индекса в качестве основы для построения региональных и глобальных карт биологической продуктивности (Козлов, Сорокина, 2011).

В работе проведен анализ снимков, сделанных 16 апреля, 2 и 11 мая, 12 и 19 июня, 14 и 30 июля и 6 и 22 августа 2012 г. Таким образом, временной диапазон снимков охватывает основную часть вегетационного периода. Снимки получены с сервера *Earthexplorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

31 мая 2003 на сенсоре ETM+ произошла ошибка корректор полосы охвата (*Scan Line Corrector* – SLC), после чего все изображения имеют клинообразные пробелы, из-за чего произошла потеря 22 % данных, которые содержатся в снимках. Такие снимки составляют коллекцию *L7 SLC-off*, доступ к которой через Интернет бесплатен. В работе используется технология заполнения пробелов, которая реализована в виде программного модуля *landsat_gapfill.sav* для программы ENVI 4.7, с помощью чего проведена коррекция полученных снимков.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ИНДЕКСА NDVI

Оценка наземной биомассы необходима для изучения продуктивности, кругооборота углерода, распределения питательных веществ в наземных экосистемах (Yu, 2004). Методы анализа данных дистанционного зондирования земли позволяют оценить свойства и процессы в экосистемах и их годичную динамику на различных масштабных уровнях, так как наблюдения со спутника проводятся со значительным пространственным охватом, высоким пространственным разрешением и временной периодичностью (Running, 2000). В ряде исследований показано, что такие индексы, как спектральный вегетационный индекс (SVI), простое отношение (SR), нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI) и скорректированный нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDV_{ic}), полученные с помощью данных со спутника, являются хорошими предикторами индекса листовой поверхности (LAI), биомассы и продуктивности лесных и луговых экосистем (Fassnacht, 1997; Jakubauskas, 1996; Nemani, 1993; Paruelo, 1998; Steininger, 2000; Tieszen, 1997).

Особенности пространственного распределения растительности в динамике по оценке индекса NDVI в пределах изучаемых полей представлены на рисунках 3 и 4. Отчетливая пространственная неоднородность характерна для распределения растительности в различные этапы вегетационного периода. Важной проблемой для понимания механизмов формирования урожайности культур является выяснение причин пространственной неоднородности фитомассы и возможности учета полученных знаний в практике сельскохозяйственного производства.

Анализ полученной информации состоит из двух этапов – статистического и геоэкономического.

Статистический подход позволяет сравнить вариабельность индекса NDVI во времени, рассматривая два поля как целостные объекты. Данные, представленные на рис. 3 и 4 свидетельствуют о том, что два поля характеризуются подобной динамикой растительности в течение вегетационного периода. Установлено, что активное развитие вегетативной массы культуры наблюдается с конца мая. Этот рост длится вплоть до середины июля. После чего наблюдается плато, которое заканчивается снижением индекса NDVI с начала августа.

Дисперсионный анализ показал (табл. 1), что между значениями NDVI на двух полях наблюдаются статистически достоверные различия. Стабильное преобладание

индекса NDVI на поле с природной технологией земледелия в сравнении с полем с интенсивной технологией наблюдается со середины июля.

Геостатистический анализ позволяет сравнить особенности пространственного распределения индекса NDVI в пределах каждого из сравниваемых полей.

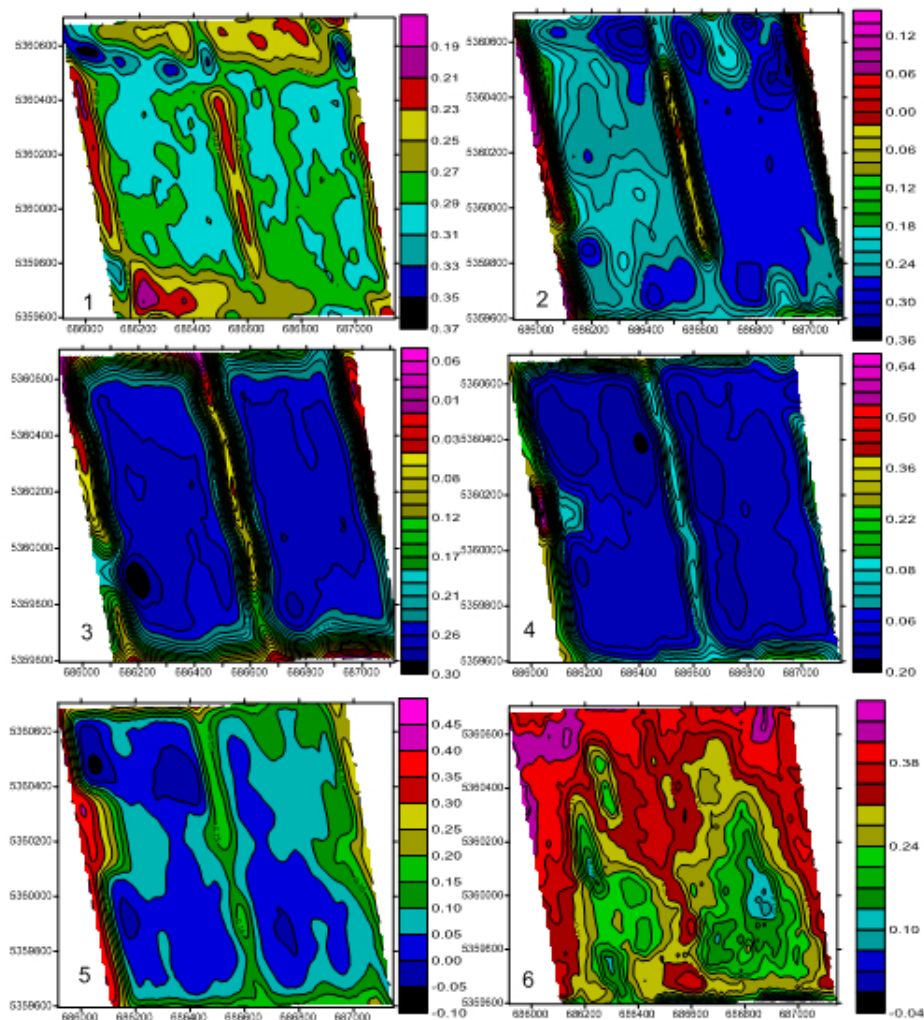


Рис. 3. Пространственная изменчивость индекса NDVI в пределах поля с природным земледелием (полигон слева) и интенсивным (полигон справа) 16 апреля 2012 г. по данным спутника Landsat ETM+

Примечание: Культура – подсолнечник. Размер ячеек раstra – 30×30 м. Проекция – UTM, 36 зона. Стрелки указывают на лесную полосу, которая разделяет два поля.

Геостатистическая процедура – кригинг – должна быть проведена для пространственно-стационарного процесса. Поэтому изначально из наблюдаемых данных должен быть извлечен пространственный тренд. Это можно сделать с помощью регрессионного анализа, если в качестве переменных-предикторов использовать пространственные координаты объектов. Экстракцию тренда мы провели с помощью полинома 3-ей степени:

$$NDVI_{xy} = a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5x^3 + a_6y^3 + a_7xy + a_8x^2y + a_9xy^2,$$

где x и y – географические координаты; $NDVI_{xy}$ – значения индекса $NDVI$ в точке с координатами x и y ; $a_1...a_9$ – регрессионные коэффициенты. Остаток регрессионной модели лишен тренда, который может быть описан полиномом 3-ей степени и может рассматриваться как стационарный пространственный процесс.

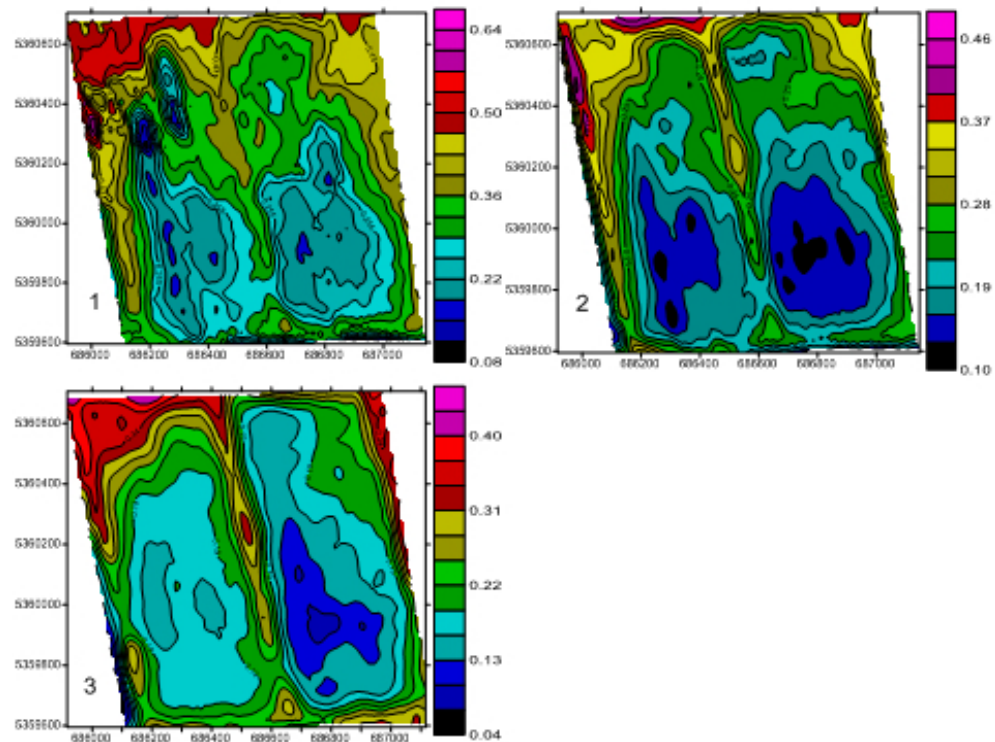


Рис. 4. Пространственная изменчивость индекса $NDVI$ в пределах поля с природным земледелием (полигон слева) и интенсивным (полигон справа) 16 апреля 2012 г. по данным спутника Landsat ETM+

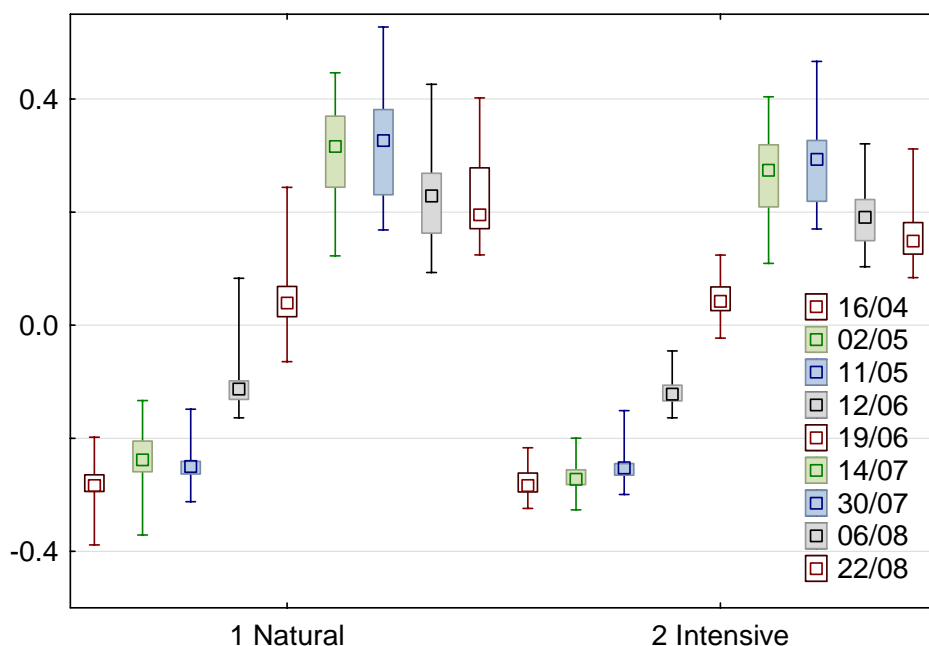
Таблица 1

Дисперсионный анализ достоверности различий вегетационного индекса $NDVI$ между полями с различными технологиями земледелия

Дата	SS - Effect	df - Effect	MS - Effect	SS - Error	df - Error	MS - Error	F-отношение	p-уровень
16 апреля	0,00	1	0,00	0,13	180	0,00	0,30	0,58
2 мая	0,05	1	0,05	0,23	180	0,00	39,59	0,00
11 мая	0,00	1	0,00	0,12	180	0,00	0,38	0,54
12 июня	0,01	1	0,01	0,21	180	0,00	6,89	0,01
19 июня	0,00	1	0,00	0,35	180	0,00	0,04	0,84
14 июля	0,07	1	0,07	1,10	180	0,01	11,52	0,00
30 июля	0,08	1	0,08	1,18	180	0,01	12,69	0,00
6 августа	0,07	1	0,07	0,62	180	0,00	19,36	0,00
22 августа	0,20	1	0,20	0,69	180	0,00	52,02	0,00

Важную информацию о природе изучаемого процесса дает доля дисперсии, описываемой регрессионной моделью зависимости переменной от пространственных координат (тренда, в нашем случае 3-й степени) – R^2 . Эта величина говорит о роли пространственного тренда в изменчивости индекса NDVI. Тренд в общем виде описывает комплекс факторов, действие которых непрерывно в пределах всей изучаемой территории.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что роль тренда усиливается вместе с увеличением общей фитомассы на полях (табл. 2). Динамика R^2 синхронна с динамикой значения индекса NDVI. Наименьшее значение R^2 наблюдается в апреле, когда растительного покрова практически нет, а индекс NDVI в этот период отражает неоднородность почвенного покрова. За исключением локального максимума значения R^2 2 мая на поле с природной технологией (0,63), рост индекса NDVI сопряжен с увеличением роли тренда в пространственной изменчивости вегетационной массы.



Условные обозначения: квадрат – медиана; прямоугольник – интервал 25 % – 75 %; линии – минимум–максимум; *Natural* – технология природного земледелия; *Intensive* – технология интенсивного земледелия.

Рис. 5. Динамика вегетационного индекса NDVI на полях с различной технологией

Различия по показателю R^2 между полями с разными типами технологий статистически не достоверны (тест Вилкоксона $Z = 0,18$, $p = 0,86$). Это говорит о сходном характере реагирования растительности на обоих полях в ответ на действие трендовых факторов.

Характеристики вариограммы дают важную информацию о пространственной организации явления либо процесса на локальном уровне. Соотношение наггет-эффекта и частичного порога указывают на роль пространства в организации переменной, а радиус автокорреляции показывает протяженность пространственного взаимодействия.

Значения наггет-эффекта и частичного порога используются для вычисления показателя пространственной автокорреляционной независимости переменной – SDL . Очевидно, логично говорить о пространственной зависимости, поэтому мы будем рассматривать комплиментарный показатель – $100 - SDL$. Автокорреляционная ком-

понента пространственной зависимости также синхронна динамике фитомассы. Показатель $100 - SDL$ наименьший в начале вегетационного периода, растет с увеличением индекса NDVI, и после достижения плато – снижается. Особенность состоит в том, что показатель $100 - SDL$ достоверно выше для поля с природной технологией земледелия (тест Вилкоксона $Z = 2,19, p = 0,03$).

Таблица 2

**Геостатистические характеристики индекса NDVI
в различные моменты вегетационного периода**

Дата	Тип земледелия	Наггет * 10^4	Порог * 10^4	Радиус, м	$100 - SDL, \%$	R^2
16 апреля	Природное	1,87	7,30	104,39	79,61	0,22
	Интенсивное	3,75	2,17	153,80	36,66	0,28
2 мая	Природное	11,40	21,03	153,21	64,85	0,63
	Интенсивное	17,06	27,82	166,72	61,99	0,37
11 мая	Природное	4,44	32,34	87,69	87,92	0,45
	Интенсивное	11,40	29,27	148,18	71,97	0,50
12 июня	Природное	32,27	74,20	317,14	69,69	0,61
	Интенсивное	12,20	28,09	176,93	69,71	0,39
19 июня	Природное	6,83	45,41	183,87	86,93	0,57
	Интенсивное	5,58	12,08	185,01	68,42	0,56
14 июля	Природное	0,00	19,18	143,73	100,00	0,72
	Интенсивное	2,14	14,91	171,44	87,46	0,76
30 июля	Природное	1,31	31,61	149,66	96,03	0,71
	Интенсивное	1,25	9,29	182,36	88,17	0,83
6 августа	Природное	0,12	28,92	157,74	99,60	0,45
	Интенсивное	3,09	6,28	172,19	67,02	0,75
22 августа	Природное	6,54	9,81	167,31	59,99	0,68
	Интенсивное	5,53	10,33	150,13	65,14	0,62

Радиус автокорреляции индекса NDVI не подвержен закономерному изменению в течение вегетационного периода и не различается статистически достоверно между двумя полями (тест Вилкоксона $Z = 1,13, p = 0,26$). Для поля с природной технологией возделывания этот показатель равен в среднем 162,75 м, а для поля с интенсивной технологией – 167,42 м. Этот факт может свидетельствовать о природе возникновения автокорреляции фитомассы. Наиболее вероятно то, что действие локальных экзогенных (в данном случае – эдафических) факторов приводит к пространственному структурированию растительного покрова. Можно сказать, что пространственная неоднородность почвенных свойств является причиной формирования пространственных паттернов растительности, что по определению является основой для внедрения системы точного земледелия.

В результате проведенной работы установлено, что важнейшей особенностью пространственной изменчивости фитомассы в агроценозах при природной и традиционной системах земледелия, является увеличение роли тренда и локальной автокорреляции при сезонном увеличении фитомассы, которое индицируется с помощью NDVI. В результате более обильное растительное сообщество становится более пространственно-структурированным. Данный результат является очевидным пространственным следствием закона лимитирующего фактора Либиха. С увеличением фитомассы в процессе вегетации факторы различной природы и различного масштабного уровня все в

большей степени оказывают свое ограничивающее влияние. Перспективным является изучение природы факторов, которые определяют пространственный тренд и локальную автокорреляцию. В качестве гипотезы можно высказать предположение, что рельеф местности определяет общий тренд изменчивости фитомассы, а локальная вариабельность эдафических свойств – пространственную автокорреляцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Герасимов И. П. Основы почвоведения и географии почв / И. П. Герасимов, М. А. Глазовская. – М. : Географиз, 1960. – 236 с.

Gerasimov, I. P., Glazovskaya, M. A., 1960, "Bases of soil science and geography of soils", Moscow, Geografiz, 236 p.

Козлов Д. Н. Инвентаризация ландшафтного покрова методами пространственного анализа для целей ландшафтного планирования / Д. Н. Козлов // Тр. Между-нар. shk.-конф. «Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология». – М. : Геогр. фак. МГУ, 2006. – С. 117-137.

Kozlov, D. N., 2006, "Inventory of landscape cover by the methods of spatial analysis for the aims of the landscape planning", *Landscape planning. General grounds. Methodology. Technology*, Moscow, Geogr. fak. MGU, pp. 117–137.

Козлов Д. Н. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа / Д. Н. Козлов, М. Ю. Пузаченко, М. В. Федяева, Ю. Г. Пузаченко // Изв. РАН. Сер. Географ.– 2008. – № 4. – С. 112-124.

Kozlov, D. N., Puzachenko, M. Y., Fedyaeva, M. V., 2008, "Reflection of the spatial varying of properties of landscape cover on basis remote information and digital elevation model", *Bull. RAS. Geographer*, 4, pp. 112–124.

Козлов Д. Н. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии / Д. Н. Козлов, Н. П. Сорокина // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М. : Изд-во Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2012. – С. 35-57.

Kozlov, D. N., Sorokina, N. P., 2012, "Traditions and innovations in the large-scale soil cartography", *Digital soil cartography: theoretical and experimental researches*, Moscow, Publishing House V. V. Dokuchaev Soil Institute, pp. 35–57.

Козловский Ф. И. Почвенный индивидуум и методы его определения / Ф. И. Козловский // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. – М. : Наука, 1970. – С. 42-59.

Kozlovskiy, F. I., 1970, "Soil individual and methods of his determination", *Regularities of the spatial varying of properties of soils and informative-statistical methods of their study*, Moscow, Science, pp. 42–59.

Козловский Ф. И. Теория и методы изучения почвенного покрова / Ф. И. Козловский. – М. : ГЕОС, 2003. – 536 с.

Kozlovskiy, F. I., 2003, "Theory and methods of study of soil cover", Moscow, GEOS, 536 p.

Кузякова И. Ф. Концепция почвенного индивидуума в свете современных представлений о почвенной неоднородности / И. Ф. Кузякова // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. – М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. – С. 324-344.

Kuzyakova, I. F., 2006, "The concept of the soil of the individual in the light of modern concepts of soil heterogeneity", *Modern natural and anthropogenic processes in soils and geosystems*, Moscow, Soils. in-t the name of V. V. Dokuchaeva, pp. 324–344.

Пузаченко Ю. Г. Методологические основания отображения элементарных геосистемных процессов / Ю. Г. Пузаченко, М. В. Федяева, Д. Н. Козлов, М. Ю. Пузаченко // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах геосистем. – М. : Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2006. – С. 13-52.

Puzachenko, Y. G., Fedyaeva, M. V., Kozlov, D. N., 2006, "Methodological grounds of reflection of elementary geosystem processes", *Modern natural and anthropogenic processes in soils of geosystems*, Moscow, Soils. in-t the name of V. V. Dokuchaev, pp. 13–52.

Самсонова В. П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв / В. П. Самсонова. – М. : Издательство ЛКИ, 2008. – 160 с.

Samsonova, V. P., 2008, "Spatial changeability of soil properties: on the example of sod-podzolic soils", Moscow, Publishing House LKI, 160 p.

Фридланд В. М. Структуры почвенного покрова мира / В. М. Фридланд. – М. : Мысль, 1984. – 238 с.

Fridland, V. M., 1984, "Structures of soil cover of the world", Moscow, Idea, 238 p.

Хорошев А. В. Современное состояние ландшафтной экологии / А. В. Хорошев, Ю. Г. Пузаченко, К. Н. Дьяконов // Изв. АН. Сер. геогр. – 2006. – № 5. – С. 12-21.

Khoroshev, A. V., Puzachenko, Y. G., D'yakonov, K. N., 2006, "Modern state landscape ecology", *Izv. AN, Geogr. ser.*, 5, pp. 12–21.

Шарый П. А. Геоморфометрия в науках о Земле и экологии, обзор методов и приложений / П. А. Шарый // Изв. Самарского НЦ РАН. 2006. – Т. 8, № 2. – С. 458-473.

Sharyy, P. A., 2006, "Geomorphometry in sciences about Earth and ecology, review of methods and application", *Izv. Samara Sc. Center*, 8, no. 2, pp. 458–473.

"Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources, for the management of multi-purpose reservoirs", 1999, Moreno, J. F., *Survey of Remote Sensing Data Analysis Methods. Contract № ENV4-CT98-0740 Version 1.0, WP 3100 - EO Signal Analysis Methods*, http://dataserv.cetp.ipsl.fr/AIMWATER/reports/EOsurvey_report.pdf

"Available fuel dynamics in nine contrasting forest ecosystems in north America", 2004, Ryu, S. R., Chen, J., Crow, T. R., Saunders, S. C., *Environmental Management*, 33, pp. 87–107.

"Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper", 1997, Fassnacht, K. S., Gower, S. T., MacKenzie, M. D., *Remote Sensing of Environment*, 61, pp. 229–245.

"Forest ecosystem processes at the watershed scale: Sensitivity to remotely sensed leaf area index estimates", 1993, Nemani, R., Pierce, L., Running, S. W., Band, L., *International Journal of Remote Sensing*, 14, pp. 2519–2534.

Jakubauskas, M. E., 1996, "Thematic Mapper characterization of lodgepole pine serals in Yellowstone National Park, USA", *Remote Sensing of Environment*, 56, pp. 118–132.

Ormeci, C., Ekercin, S., 2008, "Use of real-time remote sensing data for evaluating soil moisture and salinity effects on light penetration depth", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, Part B2, Beijing, pp. 167–173.

Paruelo, J. M., Lauenroth, W. K., 1998, "Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands", *Journal of Biogeography*, 25, pp. 721–733.

Running, S. W., Thornton, P. E., Nemani, R., Glassy, J. M., 2000, "Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system", *Methods in ecosystem science*, New York, Springer-Verlag, pp. 44–57.

Steininger, M. K., 2000, "Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: Data from Brazil and Bolivia", *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 1139–1157.

Tieszen, L., Reed, B. C., Dejong, D. D., 1997, "NDVI, C3 and C4 production, and distributions in the Great Plains grassland cover classes", *Ecological Applications*, 7, pp. 59–78.

Рекомендує до друку
д-р с.-х. наук С. Г. Чорний

Надійшла до редколегії 18.12.12