



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 3 (37). Сентябрь, 2020

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. Е. Веселов
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
A. Gugotek B.
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

А. А. Зорина
А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 574.474, 630.11, 574.474

ВЫЯВЛЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ СОСТОЯНИЙ АГРОЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

КРЕНКЕ

Александр Николаевич

кандидат наук, Институт географии РАН,
krenke-igras@yandex.ru

Ключевые слова:

дистанционное зондирование
агроэкологические условия
инвариант
факторный анализ

Аннотация: Предлагаемая работа показывает возможности анализа временных рядов мультиспектральных космических снимков среднего разрешения для выявления инвариантных пространственных структур в условиях сильного антропогенного воздействия. На примере многолетних рядов данных LANDSAT показана процедура выделения пространственных инвариантов. Процедура основана на применении метода иерархического факторного анализа многомерного пространства исходных переменных и сегментации полученного факторного пространства на дискретные состояния. Так как каждое мультиспектральное изображение – срез состояния ландшафтного покрова и его способности преобразовывать солнечную энергию, то у каждого такого среза должен быть собственный набор пространственных инвариантов, описывающих большую часть информации о работе поверхности. Из инвариантов, описывающих отдельные срезы, можно построить новые инварианты, описывающие стационарные состояния временного ряда в целом. С помощью итеративной процедуры классификации к-средних можно выделить пространственную дифференциацию данных состояний. Число таких состояний определяется принципом максимума энтропии. Устойчивость полученных дискретных состояний исследуется с помощью дискриминантного анализа, когда полученные по одному временному ряду инвариантные состояния служат обучающей выборкой для другого временного ряда снимков для той же территории. В данной статье с помощью этого подхода исследуются агроландшафты района Самарской области. Демонстрируется высокая повторяемость дискретных пространственных инвариантов в пространстве интегральных факторов для временных рядов, разделенных во времени на 10 лет. Независимо проведенные полевые исследования позволяют утверждать, что выделенные стационарные состояния могут быть соотнесены с типами почв. Проведение такого рода анализа позволяет установить с помощью дистанционных методов генетические свойства территории даже под сильным антропогенным воздействием.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 22 июля 2020 года

Подписана к печати: 01 октября 2020 года

Введение

Проблема организации сложных пространственно-временных географических динамических систем является одной из

ключевых проблем современной географии. Выделению устойчивых соотношений между множеством наблюдаемых свойств с использованием дистанционной инфор-

мации, в том числе и для агроландшафтов, посвящено множество работ (Yufeng et al., 2011; Stasyuk et al., 2017; Nawar et al., 2015; Пузаченко и др., 2003). Мультиспектральная дистанционная информация представляет собой уникальный для современной географии инструмент, позволяющий с использованием временных рядов проследить пространственно-временную динамику отражательной способности поверхности. Исходя из представления о географическом пространстве как открытой термодинамической диссипативной неравновесной системе (Jorgensen, Svirezhev, 2004; Пузаченко и др., 2019), можно рассматривать отражательную способность поверхности как проявление основных биофизических параметров, выраженных в преобразовании солнечной энергии. Возможность одновременно наблюдать изменение характеристик поверхности как во времени, так и в пространстве за счет использования дистанционной информации позволяет рассматривать ее как основу статистического моделирования широкого спектра биосферных процессов (Кренке и др., 2011; Пузаченко и др., 2006). Анализ длительных временных рядов мультиспектральных данных позволяет описать состояние и поведение экосистемы по времени. Интерпретация этих данных дает возможность определить строение экосистемы, оценить ее функциональные характеристики, в конечном счете – описать ее структуру и свойства.

В исследовании естественных экосистем с использованием данного подхода предпринято несколько успешных попыток (Козлов и др., 2008; Пузаченко, Черненко, 2016). Одним из возможных путей анализа является применение иерархического факторного анализа, позволяющего выделить независимые относительно друг друга пространственные отражения основных механизмов, определяющих пространственную дифференциацию свойств ландшафтного покрова.

В данной работе демонстрируется подход решения такой задачи для сельскохозяйственных земель, т. е. территорий, существенно преобразованных человеком. Основным условием решения такой задачи является разделение «динамических» и «стационарных» компонент организации ландшафтного покрова. К динамическим компонентам можно отнести человеческую деятельность, результаты погодной изменчивости и т. п., тогда как стационарные компоненты отражают генетические свойства

ландшафта. Мы намеренно применяем исключительно мультиспектральную дистанционную информацию (исключая дополнительные возможности, которые дает, например, цифровая модель рельефа и ее производные) для демонстрации возможностей анализа структуры отраженной солнечной радиации для выделения агроэкологических условий на основе дистанционной информации. Структура отраженной солнечной радиации отражает состояние растительного покрова и, следовательно, условия его произрастания. Таким образом, для агроландшафтов существует возможность дифференцировать условия произрастания сельскохозяйственных культур, т. е. выделить агроэкологические различия.

Цель данной статьи – продемонстрировать возможность выделения стабильных во времени интерпретируемых состояний в условиях сильного антропогенного воздействия на основе дистанционной информации.

Материалы

В качестве района исследования был выбран Большеглушицкий район Самарской области. Общая площадь с/х угодий района – 235 тыс. га. Реки района (кроме р. Большой Иргиз) маловодны и имеют нестабильный сток. Климатические условия засушливые, летом наблюдаются высокие температуры с малым количеством выпадающих осадков и сильными иссушающими ветрами. Основные почвы – степной чернозем и южные карбонатные почвы. Эрозионная сеть характеризуется лугово-черноземными почвами и почвами надпойменных террас. Район представляет собой комбинацию богатых черноземных почв высокой степени инсоляции в вегетационный период и малого количества воды. Эти условия дают возможность эффективно выращивать зерновые культуры: озимую рожь, яровую пшеницу, ячмень. При этом качество планирования использования земель приобретает особую роль. В условиях низкого увлажнения ошибки в использовании почвенных ресурсов приводят к тяжелым и трудноисправимым последствиям: переуплотнение почв, вынос органической фракции и т. п. Существенную опасность представляют также эрозионные процессы.

Для данного района было обработано два временных ряда дистанционной информации: описывающий современное состояние в рамках трехлетнего периода 2017–2018 гг. (18 сцен LANDSAT) и описывающий

ретроспективное состояние за 2008–2010 гг. (11 сцен). Оба набора данных содержат снимки, описывающие бесснежные периоды за годы наблюдений. Для семантической интерпретации были использованы материалы полевых исследований – 243 геопозиционированных почвенных разреза, на основе которых составлена карта типов почв для северо-западного участка района, в котором располагается опытное хозяйство «Степные зори». Глубина разрезов – до 120 см (до достижения почвенного горизонта В). Для каждого разреза определялся тип почв. Разрезы были привязаны с помощью средств GPS и внесены в базу данных проекта. Данные разрезы были выполнены сотрудниками Института почвоведения им. В. В. Докучаева в рамках коммерческой работы по разработке плана адаптивного земледелия в данном хозяйстве.

Методы

Основным затруднением в выделении стационарных структур агроландшафтов, обладающих устойчивой во времени совокупностью свойств, с помощью данных дистанционного зондирования является высокая изменчивость их отражательной способности. Высокая изменчивость агроландшафтов продиктована взаимосвязанными факторами погодных условий (в момент съемки и в течение года), применяемыми агротехнологиями, экономической конъюнктурой и т. п. Значения каналов спутниковой съемки (и производные индексы), измеренные в каждый конкретный момент времени, отличаются друг от друга в каждой точке пространства в той или иной степени, и коэффициенты парных корреляций сцен за разные сроки наблюдения всегда меньше единицы, а в случае агроландшафтов демонстрируют особо большую изменчивость. Можно сказать, что временные серии данных дистанционного зондирования и любых производных можно рассматривать как отображение динамической системы ландшафта. Множество зафиксированных состояний отражают преобразование свойств ландшафта как в пространстве, так и во времени. С другой стороны, на достаточно большом наборе наблюдений и интервале времени можно проследить часть неизменной информации – инвариантную ко времени составляющую, отражающую устойчивые пространственные структуры. Задача выделения стационарных компонент в подобных наборах данных может быть решена поэтапным применением

процедур сокращения размерности или иерархического факторного анализа. Суть такого подхода – в поэтапном обобщении факторного пространства: от факторов, описывающих отдельную сцену, к факторам, описывающим совокупность сцен за исследуемый период. Данная процедура позволяет в том числе осуществлять прямые сравнения различных видов спутниковых данных, например данных LANDSAT 5 и LANDSAT 8. Таким образом, открывается возможность детального анализа изменений ландшафтного покрова на всю глубину архивных данных мультиспектральной съемки. В основном процедура выделения факторов методом главных компонент подобна вращению, максимизирующему дисперсию исходного пространства переменных путем поиска линии регрессии. После того как определена линия регрессии, для которой дисперсия максимальна, вокруг нее остается некоторый разброс данных. И процедура повторяется вновь: после того как первый фактор выделен, то есть после того, как первая линия регрессии проведена, определяется следующая линия, максимизирующая остаточную вариацию (разброс данных вокруг первой прямой), и т. д. Таким образом, факторы последовательно выделяются один за другим. Так как каждый последующий фактор определяется таким образом, чтобы максимизировать изменчивость, оставшуюся от предыдущих, то факторы оказываются взаимонезависимыми, или ортогональными. В результате в процессе последовательного выделения факторов они включают в себя все меньше и меньше изменчивости (дисперсии). В качестве критерия для отбора значащих факторов в данной работе используется критерий «каменистой осыпи», который является графическим методом, впервые предложенным Р. Б. Кеттеллем. В соответствии с данным методом строится ранговое распределение дисперсий факторов от их порядкового номера, далее определяется такое место на графике, где убывание собственных значений слева направо максимально замедляется. Предполагается, что справа от этой точки находится значимое число факторов; прочие факторы несущественны. Таким образом, происходит отбор ведущих переменных, описывающих изменчивость исходных переменных, в данном случае значений каналов мультиспектральной съемки. В результате проведенного таким образом факторного анализа исходный набор переменных заменяется

другим, меньшим набором переменных, в максимальной степени описывающим (интегрирующим) исходные. В рамках факторного анализа на основе регрессионных (факторных) коэффициентов для каждой точки территории рассчитываются значения факторов, признанных интегральными для групп свойств. Далее проводится интеграция факторов, описывающих отдельные сроки съемки в обобщающие факторы, и повторяется процедура отбора наиболее значащих из них: из этих факторов отбираются те, которые имеют высокую степень связи с каждым сроком наблюдения. Как правило, первые два фактора для всех периодов показывают высокую степень связанности со всеми соответствующими сроками. Таким образом, получается набор переменных, описывающий стационарные характеристики земель за конкретный период (как правило, трех-четырёхлетний диапазон). Этот набор переменных рассматривается как инвариантный для данной территории. Другая группа значимых факторов – динамическая, это такие факторы, которые также содержат значительную информацию, но при этом имеют неравномерную систему коэффициентов, связывающих их с исходными данными. Такие факторы описывают изменчивость состояний рассматриваемой территории за взятый период наблюдений. Таким образом, получены две группы факторов, обобщающих информацию дистанционного зондирования и морфометрических характеристик рельефа за весь период наблюдения. Как правило, количество таких переменных не превышает двух-трех для каждой группы. Одновременно с этим происходит фильтрация информации, которая не попадает в описание ведущими факторами. Как правило, это локальные изменения или различные «шумовые» с точки зрения описания характеристики земель в целом процессы (например, запечатленная на снимке частичная распашка поля в конкретный момент времени). Необходимо упомянуть, что комбинаторика факторного пространства в значительной степени зависит от масштаба наблюдения. Так, например, для крупных территорий (районы, области) стационарные факторы будут иметь наибольший вес и ведущее значение в целом, а при проведении анализа на уровне хозяйства ведущими могут оказаться динамические факторы. Это явление объясняется тем, что региональный масштаб охватывает, как правило, целые статистические ансамбли агроэкологических

систем, и для таких ансамблей характерны общие закономерности поведения, в то время как масштаб отдельных хозяйств выхватывает отдельные компоненты таких систем и ведущими факторами дифференциации становятся неоднородные хозяйственные процессы. Схема иерархического факторного анализа представлена на рис. 1.

Для того чтобы перейти от пространства инвариантных свойств к дискретным ландшафтными объектам, необходимо провести классификацию полученного отображения. Полученные интегральные факторы подвергаются процедуре беспороговой итеративной классификации методом *k*-средних. Данный алгоритм порождает бесконечное количество (до установленного порога разделимости или числа анализируемых объектов) вложенных классов по основанию 2. Оптимальный уровень классификации (т. е. количество делений) можно определить исходя из критерия максимума энтропии. Выявление степени стационарности выбранных объектов производится с помощью дискриминантного анализа. Дискриминантный анализ с помощью построения т. н. дискриминантных функций соотносит значения дискретной переменной (например, различных классов объектов) с набором непрерывных свойств (например, данных ДЗЗ). Дискриминантные функции могут рассматриваться как наиболее эффективные проекции, позволяющие разделить дискретные классы по их свойствам. Результатом дискриминантного анализа является вычисление вероятности того, что каждый конкретный случай отображения того или иного класса соответствует самому себе, и с какой вероятностью это отображение переходит в другой класс. В данном случае мы можем использовать в качестве обучающей выборки полученные дискретные классы для одного периода, а в качестве независимых переменных – континуальные факторы, полученные для другого периода. Полезным инструментом для изучения результатов дискриминантного анализа является так называемая таблица спутанности – эта таблица отражает переходы классов друг в друга, которые произошли по результатам анализа. По диагонали таблицы – «точные попадания» классов самих в себя. Если классы ранжированы по каким-то характеристикам или имеют качественные взаимосвязи, то по переходам можно установить, насколько достоверно изначально был задан класс и каковы типичные для него переходы в другие состояния. Полученная

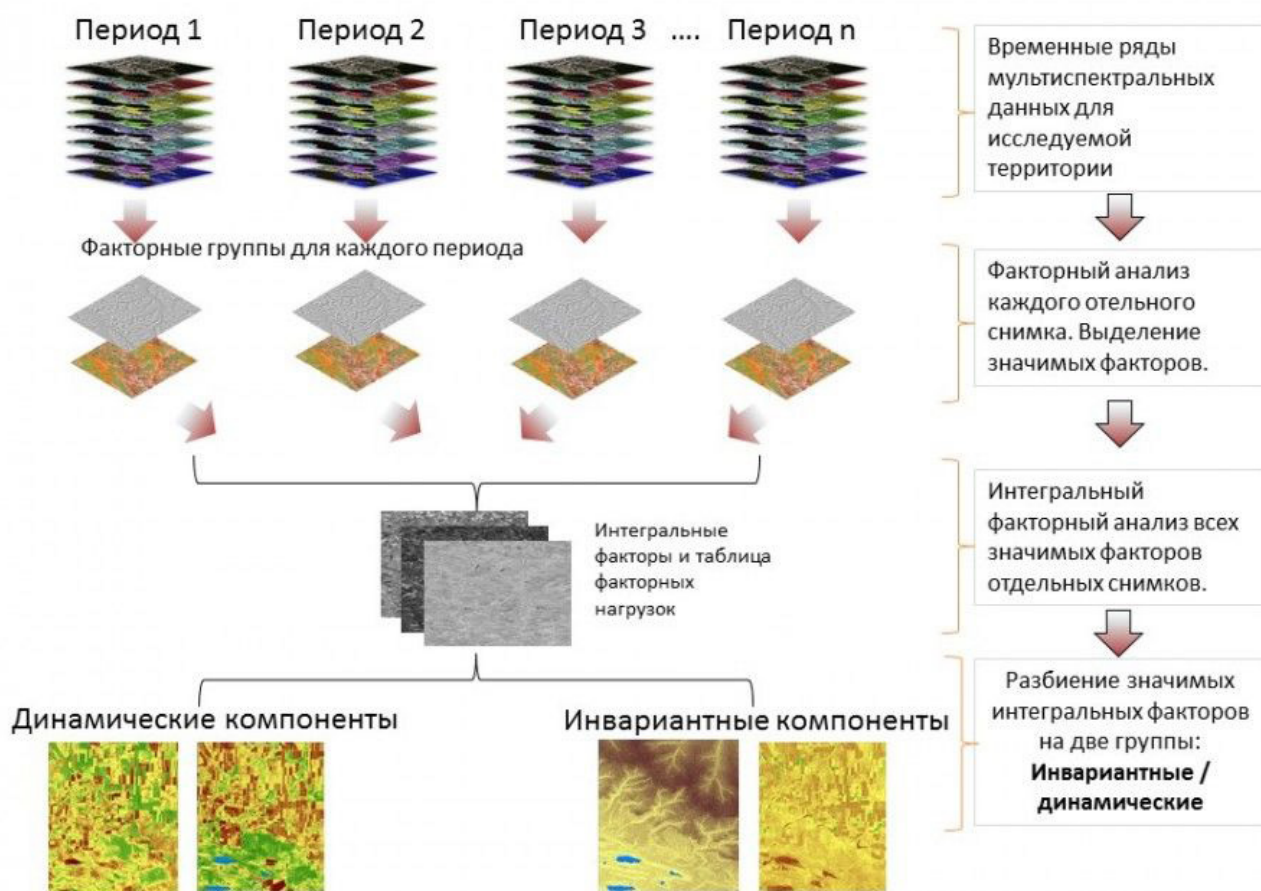


Рис. 1. Схема проведения иерархического факторного анализа
Fig. 1. Scheme of hierarchical factor analysis

классификация может рассматриваться как пространственная изменчивость устойчивых во времени свойств ландшафтов (на наблюдаемом промежутке). Физический смысл данных классов (как и образующих их инвариант) можно установить через анализ их связи с известными физически интерпретируемыми индексами дистанционного зондирования или полевыми наблюдениями.

Результаты

Согласно методике были рассчитаны интегральные факторы для двух периодов: современный (2018–2020 гг.) и ретроспективный (2008–2010 гг.).

Агроэкологические различия были получены на основе классификации интегральных факторов «современного» периода для нескольких иерархических уровней дихотомической классификации к-средних. Исходя из критерия максимума энтропии оптимальные уровни разбиения соответствуют 3-й и 4-й степеням основания классификации, т. е. 8-му и 16-му классам.

Полученная классификация была подвергнута процедуре дискриминантного анализа с использованием ретроспективного периода как реферативного. Дискриминантный анализ показывает хорошую воспроизводимость полученной классификации для состояния 10-летней давности: общее качество распознавания для 8 классов составило 72.3 % а для 16 классов – 64.9 %. Результаты анализа для 8 классов представлены в соответствующей таблице спутанности (табл. 1).

Таким образом, классы, полученные на основе интегральных факторов периода 2017–2019 гг., с высокой достоверностью распознаются через факторы, полученные на основе данных 2008–2010 гг. Можно заключить, что полученные классы описывают стационарные ядра пространственных ландшафтных состояний, или в данном случае агроэкологических различий, повторяющихся на большом отрезке времени.

Чтобы выявить связи между полученными через ДЗЗ агроэкологическими различиями и типами почв, определенными в поле,

Таблица 1. Таблица спутанности распознавания 8 классов состояний

Класс	Классификация: строки – исходная выборка, колонки – результат распознавания								
	Процент совпадения	1	2	3	4	5	6	7	8
1	81.5	81.5	13.2	0.5	0	4.7	0	0	0
2	68.9	15.5	68.9	15.5	0.2	0	0	0	0
3	75.5	2.9	12.5	75.5	9.1	0	0	0	0
4	75.1	3.8	1.8	16.3	75.1	0	0	0.6	2.4
5	57.5	24.2	0.2	0.1	0	57.5	18	0.1	0
6	77.6	4.4	0	0	0	11.2	77.6	6.7	0
7	84.6	5.6	0.1	0.2	0.2	0.8	3.7	84.6	4.7
8	60.1	3.6	0.2	1	12.3	0	0	22.7	60.1
Всего	72.3								

использовался метод анализа соответствий. Данный метод совмещает идеологию факторного анализа и метода многомерного шкалирования. Суть метода заключается в анализе частотных таблиц сопряженности, т. е. того, как объекты из набора данных А пересекаются с объектами из набора данных Б. Наборы пересечений дают возможность построить взаимные дистанции между всеми объектами наборов данных А и Б. Имея набор дистанций, можно смоделировать искусственный базис с минимальным количеством осей, позволяющий разместить все объекты с учетом их взаимных расстояний. Исходя из положения наборов объектов в этом искусственном базисе, можно сделать заключение о том, какие из них близки друг другу. Если же какие-то объекты не имеют близких пар из другого набора данных, то это означает, что они в нем не отображаются. Значимость каждой оси задается параметром «инерции», который по своей сути похож на вес фактора в факторном анализе.

В нашем случае первые две оси имеют совокупную инерцию 71 %, т. е. дают возможность взаиморазместить объекты с данной точностью. Если рассматривать три оси, то они описывают 82.7 % размещений. Результат такого размещения по двум первым осям представлен на рис. 2.

Используя полученное отображение, мы можем составить таблицу соответствий (табл. 2). В скобках указаны значения, полученные с использованием третьей оси.

Используя приведенную таблицу, становится возможным определить семантику выделенных по данным ДЗЗ агроэкологических разностей с точки зрения почвенных типов и классов почв. Можно отметить, что, исходя из рис. 3 и данных табл. 2, выделен-

ные агроэкологические разности непротиворечиво размещаются в пространстве классов почв. Полученный результат (с учетом семантической интерпретации данных ДЗЗ) представлен на рис. 3.

Обсуждение

Ключевым результатом представленного сообщения является выделение пространственных структур, надежно повторяющихся во времени и обладающих интерпретируемой семантикой. То, что классификация, полученная на основе интегральных факторов за трехлетний период 2017–2019 гг., с высокой точностью воспроизводится через интегральные факторы 2008–2010 гг., означает, что через ряды дистанционной информации достаточной длины можно выделить стационарные структуры даже для территорий с сильной спектральной изменчивостью во времени. Также это доказывает существование пространственных инвариантов, комбинирующих антропогенные и естественные факторы дифференциации ландшафтов, отражение которых содержится в дистанционной информации. Полученные инварианты могут использоваться как базовая структура, которую можно соотносить как с варьированием внутри породившего ее временного ряда, так и с варьированием относительно более широкого наблюдаемого диапазона. Таким образом решается важная задача разделения относительно стационарных и динамических компонент агроландшафтов.

Результирующая карта инвариантных состояний может быть интерпретирована в виде устойчивых агроэкологических разностей. Необходимо отметить, что наблюдаемая картина отличается от равновесного рельефу состояния почвенного покрова. В

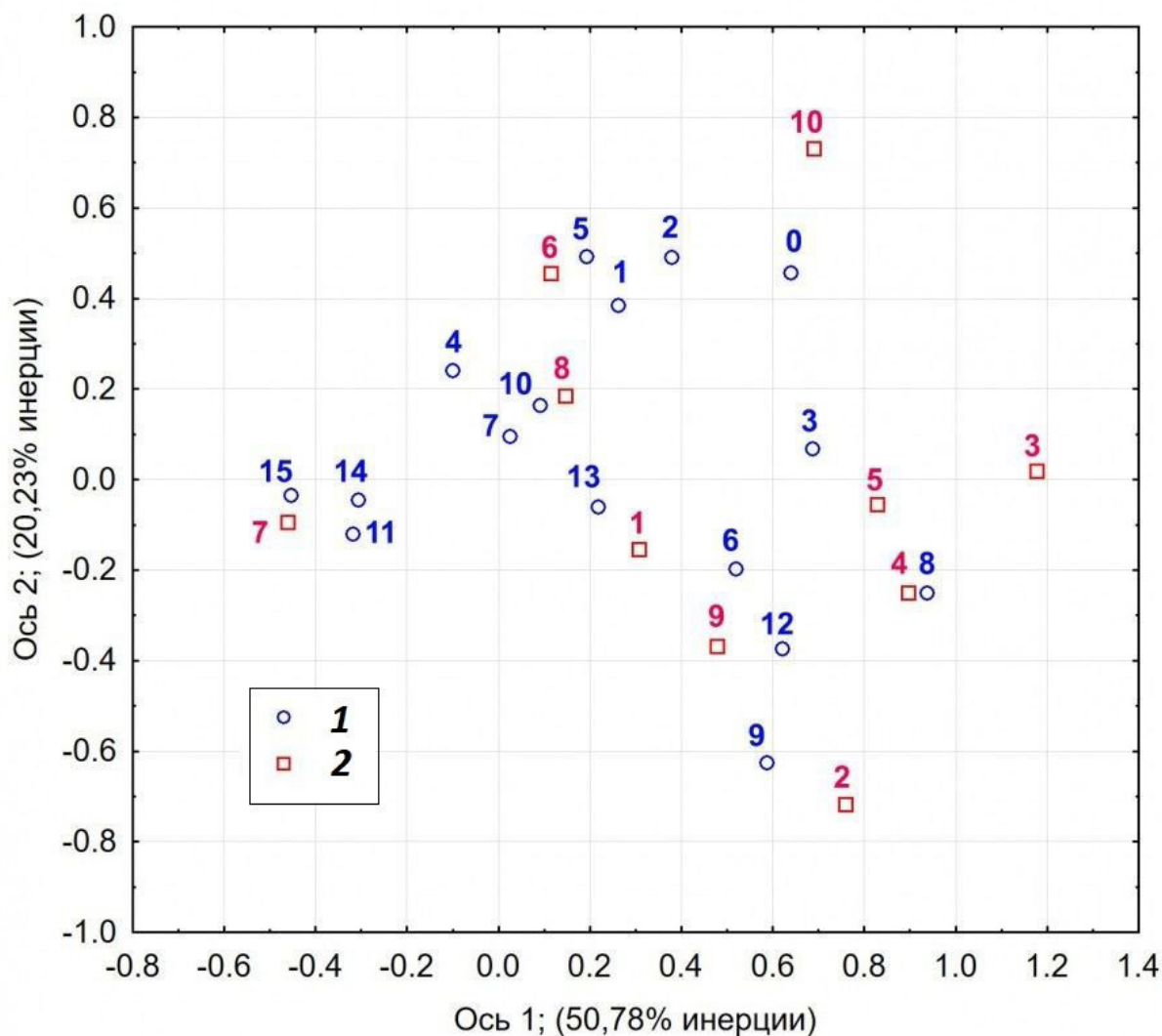


Рис. 2. Сопоставление результатов выделения агроэкологических классов по данным ДЗЗ с результатами полевых исследований. 1 – различия по ДЗЗ; 2 – типы почв по полевым данным

Fig. 2. Comparison of the results of allocation of agroecological classes according to remote sensing data with the results of field research. 1 – ERS differences; 2 – soil types according to field data

условиях интенсивного и продолжительного использования территории для нужд сельского хозяйства типы почвенного покрова в практическом смысле меняются в зависимости от характера землепользования. Например, при регулярном переуплотнении почвы в результате обработки будет уменьшаться гумусовый слой и меняться его механический состав. Также на процессы изменения почвенного покрова влияет использование различных схем севооборота. Эти процессы приводят к тому, что актуальные типы почв часто совпадают с границами полей и могут образовывать лоскутную пространственную структуру. Возможность наблюдения за этими процессами с помощью предлагаемой методологии может существенно улучшить

качество отраслевого почвенного картографирования относительно традиционных методов, которые прежде всего опираются на экстраполяцию полученных данных исходя из свойств рельефа и генетических свойств почв.

Заключение

В данном сообщении показана возможность интерпретации факторного пространства, интегрирующего временные ряды данных ДЗЗ для агроландшафтов. Полученные различия обладают явной связью с полевыми данными, что подтверждает их осмысленность. Существенным преимуществом методики является возможность выявить дифференциацию агроэкологических свойств без

Таблица 2. Результаты сопоставления классов земель, рассчитанных по данным ДЗЗ, с результатами полевых исследований

Классы земель (почв. карта)	Название	Классы земель по данным ДЗЗ
1	Аллювиальная дерновая слоистая солончаковатая слабозасоленная легкоглинистая	13
2	Комплекс: 1. Чернозем южный карбонатный малогумусный маломощный легкоглинистый; 2. Солонец черноземный	9
3	Луговато-черноземная малогумусная среднеспособная легкоглинистая	(8)
4	Лугово-черноземная солончаковатая сильнозасоленная малогумусная мощная легкоглинистая	8
5	Солонец черноземный глубокосолончаковатый сильнозасоленный мелкий среднеглинистый	3
6	Чернозем обыкновенный малогумусный маломощный легкоглинистый	5, 1, 2
7	Чернозем южный малогумусный маломощный легкоглинистый	15, 14, 11
8	Чернозем южный карбонатный малогумусный маломощный легкоглинистый	4, 7, 10
9	Чернозем южный карбонатный слабогумусированный маломощный	12, 6
10	Чернозем южный остаточный солонцеватый слабогумусированный среднеспособный легкоглинистый	0

использования сторонних соображений о свойствах почвенного покрова, таким образом, полевые данные и тематические карты служат как инструменты выявления семантики и проверки полученных результатов, а не определяют их. Это преимущество позволяет выйти за пределы доступных знаний о территории и отразить реальные процессы трансформации почвенного покрова на больших площадях с учетом структуры землепользования и фактически позволяют смоделировать историю землепользования, что чрезвычайно важно для корректного планирования хозяйства. С точки зрения изучения динамических природных систем показана возможность выделения обобщающих факторов в условиях сложной, затронутой человеком динамики. Полученные факторы сами обладают физически интерпретируемым

смыслом и могут рассматриваться как отражения взаимонезависимых процессов, имеющих разную скорость и пространственную иерархию. Дальнейшее направление работ лежит в области идентификации этого физического смысла и построения карт процессов и свойств почвенного покрова, таких как эрозия, динамика содержания органического материала в почве, режим увлажнения и дренажа и т. д. Составление соответствующих карт процессов на основе интегральных факторов совместно с дифференциацией агроэкологических разностей создает основу для организации интенсивного сельского хозяйства и мониторинга деградации почв, при этом формирование данной основы существенно дешевле и оперативнее традиционных методов.

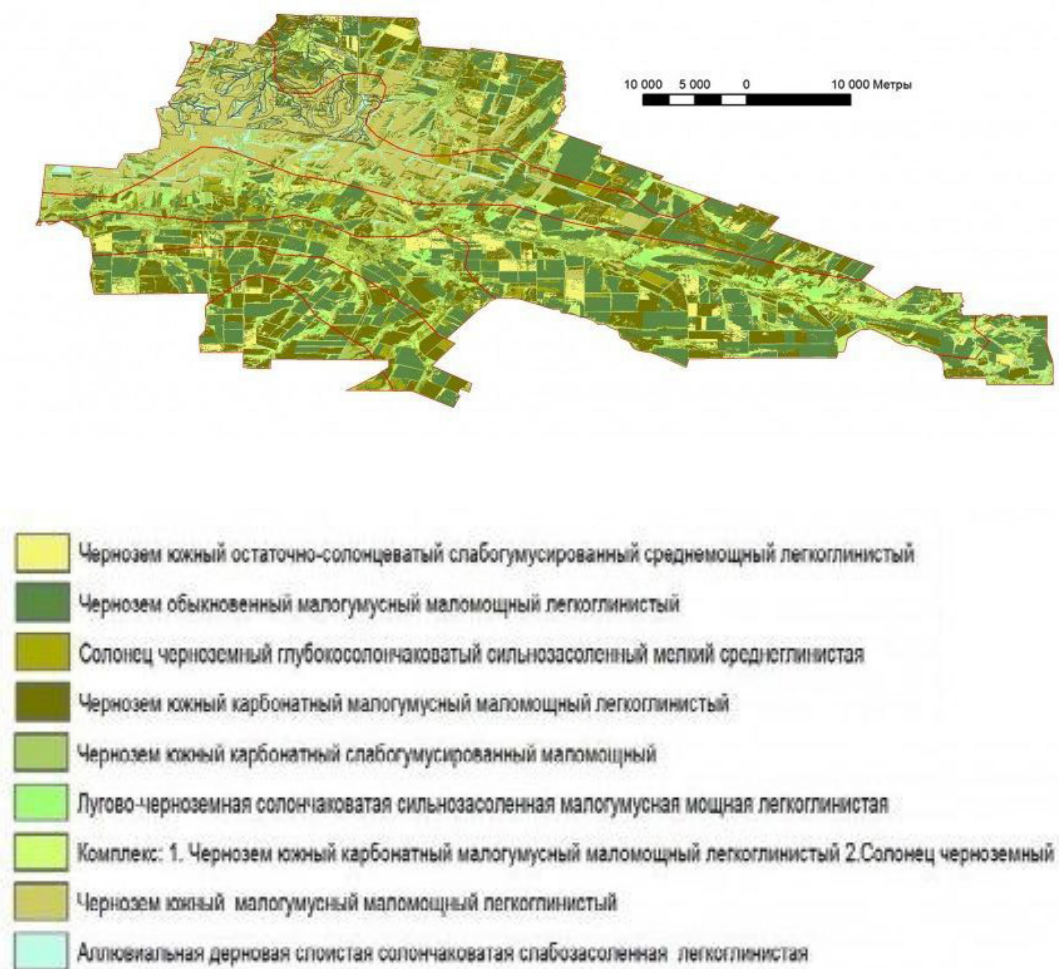


Рис. 3. Полученная карта агроэкологических (почвенных) разностей

Fig. 3. The resulting map of agroecological (soil) differences

Библиография

- Козлов Д. Н., Пузаченко М. Ю., Федяева М. В., Пузаченко Ю. Г. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2008. № 4. С. 112–124.
- Кренке А. Н., Пузаченко М. Ю., Пузаченко Ю. Г. Уточнение содержания тематических карт на основе данных дистанционного зондирования // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2011. № 4. С. 86–96.
- Пузаченко М. Ю., Черненко Т. В. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167–191.
- Пузаченко М. Ю., Пузаченко Ю. Г., Козлов Д. Н., Федяева М. В. Картографирование мощности органического и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (LANDSAT 7) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 70–79.
- Пузаченко Ю. Г., Байбар А. С., Варлагин А. В. и др. Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2019а. № 2. С. 51–68.
- Пузаченко Ю. Г., Кренке А. Н., Пузаченко М. Ю. и др. Оценка термодинамических параметров ландшафтного покрова по мультиспектральным измерениям отраженной солнечной радиации (landsat) на основе неэкстенсивной статистической механики // Доклады Академии наук. 2019б. Т. 487. № 3. С. 310–316.
- Пузаченко Ю. Г., Хорошев А. В., Алещенко Г. М. Анализ организации ландшафта на основе космиче-

ского снимка // Исследование Земли из космоса. 2003. № 3. С. 63–71.

Jorgensen S. E., Svirezhev Yu. M. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Oxford: Elsevier, 2004. 366 p.

Nawar S., Buddenbaum H., Hill J. Digital Mapping of Soil Properties Using Multivariate Statistical Analysis and ASTER Data in an Arid Region // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7 (2). P. 1181–1205.

Stasyuk N. V., Tseits M. A., Konyushkova M. V., and Marechek M. S. Verification of predicted dynamics of soil degradation using satellite imagery // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2017. Vol. 72 (4). P. 161–164.

Yufeng Ge, Thomasson J., Ruixiu Sui. Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review // *Frontiers of Earth Science*. 2011. Vol. 5. P. 229–238.

Благодарности

Статья подготовлена по теме Государственного задания 0148-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8) «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования». Исследование полевых данных выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-16-00211А.

IDENTIFICATION OF INVARIANT STATES OF AGRICULTURAL LANDSCAPES BASED ON HIERARCHICAL FACTOR ANALYSIS OF REMOTE SENSING INFORMATION

KRENKE

Alexander Nikolaevich

*PhD, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
krenke-igras@yandex.ru*

Keywords:

remote sensing
agroecological conditions
invariant
factor analysis

Summary: The proposed work shows the possibilities of analyzing the time series of multispectral satellite images of medium resolution to identify invariant spatial structures under conditions of strong anthropogenic impact. The procedure for selecting spatial invariants is shown on the example of multi-year LANDSAT data series. The procedure is based on applying the method of hierarchical factor analysis of the multidimensional space of initial variables and segmentation of the resulting factor space into discrete states. Since each multispectral image is a cross-section of the state of the landscape cover and its ability to convert solar energy, each cross-section must have its own set of spatial invariants that describe most of the information about the work of the surface. From the invariant describing individual cross-sections, it is possible to construct new invariants that describe the stationary states of the time series as a whole. Using an iterative K-means procedure, the spatial differentiation of these states can be distinguished. The number of such states is determined by the principle of maximum entropy. The stability of the obtained discrete states is investigated using discriminant analysis, when the invariant states obtained from one time series serve as a training sample for another time series of images for the same territory. In this article, this approach is used to study the agricultural landscapes of the Samara region. We demonstrate high repeatability of discrete spatial invariants in the space of integral factors for time series separated in time by 10 years. Independently conducted field studies suggest that the selected stationary states can be correlated with soil types. This type of analysis makes it possible to establish the genetic properties of a territory, using remote methods, even under strong anthropogenic influence.

Received on: 22 July 2020

Published on: 01 September 2020

References

- Jorgensen S. E., Svirezhev Yu. M. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Oxford: Elsevier, 2004. 366 p.
- Kozlov D. N. Puzachenko M. Yu. Fedyaeva M. V. Puzachenko Yu. G. Display of spatial variation of landscape cover properties based on remote sensing information and digital elevation model, *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Ser. geogr.* 2008. No. 4. P. 112–124.
- Krenke A. N. Puzachenko M. Yu. Puzachenko Yu. G. Correction of the content of thematic maps based on remote sensing data, *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Ser. geogr.* 2011. No. 4. P. 86–96.
- Nawar S., Buddenbaum H., Hill J. Digital Mapping of Soil Properties Using Multivariate Statistical Analysis and ASTER Data in an Arid Region, *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7 (2). P. 1181–1205.
- Puzachenko M. Yu. Chernenkova T. V. Determination of factors of spatial variation of vegetation cover using remote sensing data, digital elevation models and field data on the example of the central part of the Murmansk region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13. No. 5. P. 167–191.
- Puzachenko M. Yu. Puzachenko Yu. G. Kozlov D. N. Fedyaeva M. V. Mapping the thickness of the organogenic and humus horizons of forest soils and bogs in the southern taiga landscape (southwest of the Valdai hills) based on a three-dimensional relief model and remote sensing information (LANDSAT 7), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2006. No. 4. P. 70–79.
- Puzachenko Yu. G. Baybar A. S. Varlagin A. V. The thermal field of the southern taiga landscape of the Russian Plain, *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Ser. geogr.* 2019a. No. 2. P. 51–68.
- Puzachenko Yu. G. Horoshev A. V. Aleschenko G. M. Analysis of organization of landscape on the basis of

satellite images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2003. No. 3. P. 63–71.

Puzachenko Yu. G. Krenke A. N. Puzachenko M. Yu. Estimation of thermodynamic parameters of landscape cover from multispectral measurements of reflected solar radiation (landsat) based on non-extensive statistical mechanics, *Doklady Akademii nauk*. 2019b. T. 487. No. 3. P. 310–316.

Stasyuk N. V., Tseits M. A., Konyushkova M. V., and Marechek M. S. Verification of predicted dynamics of soil degradation using satellite imagery, *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2017. Vol. 72 (4). P. 161–164.

Yufeng Ge, Thomasson J., Ruixiu Sui. Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review, *Frontiers of Earth Science*. 2011. Vol. 5. P. 229–238.