

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 911.5/9

### ЛАНДШАФТНЫЕ ИНВАРИАНТЫ – ПАРАМЕТРЫ ПОРЯДКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2023 г. А. С. Байбар<sup>a, b, c, \*</sup>, М. Ю. Пузаченко<sup>a</sup>, Р. Б. Сандлерский<sup>b, c</sup>, А. Н. Кренке<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

\*e-mail: baybaranastasia@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.05.2021 г.

После доработки 09.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В статье рассматриваются методологические обоснования проблемы выделения инвариантов нелинейных динамических систем в ландшафтоведении. Понятие инвариантности в контексте существования устойчивых во времени пространственных структур в ландшафте было предложено В.Б. Сочавой (1961). С накоплением многолетних рядов наблюдений состояний ландшафта посредством мультиспектральной съемки, выделение таких инвариантов стало осуществимо на практике. На примере анализа мультиспектральных измерений отражения солнечной радиации для южно-таежного ландшафта (Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник) со спутников серии Landsat с 1987 по 2022 г. показано, что инварианты, последовательно выделяемые методом главных компонент как параметры порядка, в первую очередь определяют общую надземную биомассу растительности, содержание воды в растительности и почвах и интенсивность фотосинтеза, т.е. биопродукционного процесса. Предложенная схема анализа временных рядов дистанционной информации позволяет оценивать ландшафтный покров в момент съемки относительно инварианта как предельного стационарного состояния ландшафта и выявлять основные управляющие параметры, определяющие изменения условий среды и саморазвитие системы. Для выявления физического смысла полученных инвариантов был проанализирован вклад растительности и рельефа в формирование его структуры. Показано, что рельеф слабо влияет на параметры порядка, а наибольший вклад в формирование инвариантной структуры вносят характеристики растительного покрова. Так как инварианты позволяют выделить наиболее стационарные состояния, то очевидны возможности их применения для решения прикладных задач в сельском и лесном хозяйстве, а также в оценке различных экосистемных услуг.

*Ключевые слова:* параметры порядка, инвариант, синергетика, Landsat, МДДЗ, ЦЛГПБЗ, метод главных компонент, геоботанические описания, морфометрические характеристики рельефа, южно-таежный ландшафт, юг Валдайской возвышенности

**DOI:** 10.31857/S2587556623030056, **EDN:** QQWOKE

#### ВВЕДЕНИЕ

Развитие средств измерения свойств ландшафта позволило применить к анализу его функционирования методический подход, основой которого является представление о ландшафте, как о сложной динамической системе (Пузаченко, 2010). Согласно теории динамических систем, состояние системы – есть положение ее элементов в пространстве признаков в момент времени, а собственно “динамическая система” – процесс смены этих состояний. Объем накопленных данных мультиспектральной съемки позволяет исследователям оперировать рядами измерений отраженной солнечной радиации в различных спектральных диапазонах. Результат одного тако-

го измерения – набор функциональных переменных, отражающих процессы преобразования солнечной энергии растительным покровом в зависимости от положения в рельефе, погодных условий и других факторов. Располагая таким набором состояний, мы получаем возможность “отследить” траекторию как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Траектории в соседних точках могут иметь различную степень подобию. Группы соседних точек с подобными траекториями образуют аттрактор, определяемый единым механизмом регулирования флуктуаций среды, и могут быть ассоциированы с целостными пространственными системами. Группы соседних точек с различными траекториями образуют конти-

нуум, в общем случае отражающий изменяющиеся в пространстве и/или времени механизмы функционирования. Соотношения в пространстве между этими крайними формами аттрактора определяют уровень организации ландшафта. Теория динамических нелинейных систем позволяет моделировать эти аттракторы. В ее рамках развиты представления о диссипативных системах и методы оценки устойчивости движения. Заданную таким образом динамическую систему можно исследовать на протяжении различных временных интервалов (сутки, сезоны, многолетние циклы).

Накопление мультиспектральной дистанционной информации позволяет сформулировать цель настоящей статьи – разработка методологии анализа реальных рядов измерений функциональных переменных ландшафта, отображающих в первую очередь работу растительного покрова по преобразованию солнечной энергии. Этот подход должен создать основу максимально полного использования мультиспектральных дистанционных измерений со спутников и БПЛА в различных временных диапазонах.

В качестве теоретико-методологического основания для исследования пространственно-временной динамики геосистем может рассматриваться синергетика. Введенное одним из ее основоположников Г. Хакеном (1980) представление о параметрах порядка системы – небольшом числе независимых переменных, определяющих все наблюдаемое разнообразие состояний функциональных переменных системы, практически тождественно представлению об инварианте геосистемы В.Б. Сочавы (1978) как некоторой пространственной структуры, неизменной на определенном временном интервале. Синергетика, в свою очередь, наряду с отрицательными обратными связями, порождающими осцилляторы, рассматривает и положительные обратные связи – основу самоорганизации.

В настоящем сообщении сделана попытка обобщить современные теоретические представления об инвариантах как параметрах порядка геосистем и продемонстрировать их выделение и семантическую интерпретацию на примере ряда измерений отраженной солнечной радиации съемочными системами спутников семейства Landsat для хорошо изученной дистанционными и наземными методами территории Центрально-Лесного заповедника (Тверская область).

## ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Термин “инвариант” (от латинского “invariant” – неизменяющийся) был введен английским математиком Джеймсом Джозефом Сильвестром в середине XIX в. Тогда же совместно с А. Кэли им

была разработана алгебраическая теория инвариантов, изучающая неизменяющиеся или частично изменяющиеся при замене линейных переменных многочлены или рациональные функции (Бородин и др., 1979). Во второй половине XIX в. теория инвариантов оформилась как самостоятельная математическая дисциплина, которую в последующие годы развивал Давид Гильберт. В первую половину 20 в. термин использовался только для объяснения неизменных величин в алгебре и геометрии. Но в последующие годы ввиду его универсальности он постепенно вошел практически во все науки: физику, программирование, экономику, лингвистику, философию, географию и т.д.

В географию термин “инвариант” был введен в период внедрения теории сложных систем, идей кибернетики, моделирования и математических методов в естественные науки. Сделал это В.Б. Сочава, по мнению которого инвариант ландшафта – это совокупность свойств геосистемы, которые остаются неизменными при ее преобразовании (1978, с. 293). А.А. Крауклис (1979) вслед за В.Б. Сочавой рассматривал инвариантность как неотъемлемый атрибут структуры ландшафта. В то же время В.С. Преображенский (Преображенский, Александрова, 1975, с. 400), признавая важность этого понятия для определения динамики и эволюции ландшафта, указывал на отсутствие критериев выделения инвариантной ландшафтной структуры, ее границ и методов, определяющих ее в полевых условиях.

Ф.Н. Мильков принципиально переосмыслил термин “инвариант ландшафта”, определив инвариантность как наиболее общие и устойчивые черты структуры типа ландшафтного комплекса на уровне семейства (Бевз, 2002), а “инвариант ландшафта” как его типовую структуру на разных иерархических уровнях (Мильков, 1986). Он считал, что “инвариант” заменил понятие “тип”, а вместе с тем и “тип ландшафта, местности и урочища”, принятые ранее в отечественной географии. В трактовке термина по Милькову исчезла связь инварианта с динамической системой, которую имел в виду В.Б. Сочава (1978). После переосмысления понятия Ф.Н. Мильковым в литературе распространяется “статическое” представление об инварианте, его ассоциируют с наиболее инертными компонентами ландшафта: с литогенной основой (Бевз, 2002; Большаков, 2004; Васильев и др., 2009) или с почвой (Петришев и др., 2011). Таким образом, в начале XXI в. статическое представление об инварианте, весьма далекое от идей В.Б. Сочавы, стало наиболее “популярным” в ландшафтоведении. Так, например, Г.С. Макунина использует термин гидротермический инвариант, под которым она понимает годовые средне-многолетние показатели количества осадков, стока и валовой влагообеспеченности почвы (Макунина,

2011). В то же время оно продолжает восприниматься исследовательским сообществом в целом как весьма абстрактное. По мнению Д.В. Черных (2015), инварианты, предложенные В.Б. Сочавой, до сих не исследованы, не раскрыты на региональном материале и вызывают недопонимание у большинства физико-географов и ландшафтоведов. Абстрактность понятия и потеря его связи с собственно динамикой системы, определялась в значительной степени тем, что наука не располагала долговременными временными рядами измерений каких-либо переменных, отображаемых в пространстве, на основе которых можно осуществить выделение инвариантов.

В англоязычной географии и ландшафтной экологии подход с позиции динамических систем развит слабо. Это определяется начальными эмпирическими постулатами мозаики, определенными Форманом и Годроном (Forman, 1995; Forman and Godron, 1986). В основополагающих работах Тюрнера, О'Нила и Ву (Turner, 1989, 2005; Turner et al., 2001; O'Neill et al., 1988; Wu, 2004, 2006) ставится проблема масштаба с различных логически обосновываемых позиций, без какого-либо обращения к теореме отчета, являющейся строго математической основой влияния частоты измерений на отображения переходных зон и границ. Вводятся представления об иерархии (O'Neill et al., 1986), опирающиеся практически только на феноменологию (Allen and Starr, 1982), полностью игнорируя теорию нелинейных динамических систем, воспроизводящую основные формы иерархии и механизмы их возникновения. Работы, обращающиеся к простейшим моделям динамических систем, редки и не имеют какого-либо приложения к задачам с нелинейной динамикой (Gobattoni et al., 2013). Таким образом, идея рассматривать ландшафт как сложную нелинейную динамическую систему развивается, в основном, в рамках отечественной науки.

#### РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИНВАРИАНТАХ В РАБОТАХ Ю.Г. ПУЗАЧЕНКО

Исходное представление об инварианте, как неизменном на данном интервале времени параметре динамической системы, последовательно развивал Ю.Г. Пузаченко (1983, 2010, 2019). В его работе "Инвариантность геосистем и их компонентов" (1983) формулируются основные механизмы-условия инвариантности динамической системы: принцип многосвязности и принцип компенсирующих связей (двухканальности).

**Принцип многосвязности.** Так как в природе нет систем, абсолютно не реагирующих на внешние возмущения, то предлагается рассматривать относительную инвариантность, то есть смену состояний, происходящую в пределах  $\pm \varepsilon$  и явля-

ющуюся несущественной. При этом вероятность отклонения функции системы ( $F$ ) от среднего, за пределы интервала  $[F - \varepsilon; F + \varepsilon]$ , оценивается через дисперсию.

При слабо коррелирующих входных переменных инвариантность функции тем больше, чем больше число аргументов:

$$F = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + a_nX_n, \quad (1)$$

где  $F$  – функция системы,  $X_i$  – входные аргументы (переменные),  $a_i$  – коэффициенты, принадлежащие интервалу  $[0;1]$ . При  $\sum_1^n a_i = 1$  дисперсия функции ( $DF$ ) может быть найдена по формуле:

$$DF = a_1^2DX_1 + a_2^2DX_2 + \dots + a_n^2DX_n. \quad (2)$$

Если дисперсии входных аргументов равны, то минимум дисперсии функции будет достигаться при одинаковых коэффициентах:

$$\min DF = DX_i/n. \quad (3)$$

Однако, если они не равны, то минимум дисперсии функции будет наблюдаться при коэффициентах  $a_i$  обратно пропорциональных  $DX_i$ . Дисперсия функции, зависящей от нескольких переменных, при неравенстве отклонений всегда заведомо ниже, чем максимальная дисперсия переменных ( $DF \leq \max(DX_i)$ ). Данное утверждение справедливо и при взаимосвязанных аргументах  $X_i$ . Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением многосвязности дисперсия функции системы будет меньше при большем количестве аргументов, то есть с большей вероятностью значения будут принадлежать интервалу  $\pm \varepsilon$ . В результате, сложные системы обладают большей инвариантностью, чем простые. Следовательно, инвариантность системы может быть оценена через количество факторов, определяющих систему, а факторный и дисперсионный анализ, метод главных компонент являются основными статистическими методами, позволяющими оценить инвариантность реально существующих природных объектов (Пузаченко, 1983).

**Принцип компенсирующих связей (двухканальности).** Необходимое и достаточное условие реализации инвариантной системы – присутствие двух и более каналов, передающих возмущение, а их эквивалентная компенсирующая функция равна нулю (Самонастраивающиеся ..., 1969).

Функция системы  $F$  имеет два канала  $F_1$  и  $F_2$ , принимающих из внешней среды сигналы  $X_1, \dots, X_n$  с некоторой константой  $C$ .

$$F = F_1 + F_2 + C, \quad (4)$$

$$F_1 = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n, \quad (5)$$

$$F_2 = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n. \quad (6)$$

Значения  $F$  остаются постоянными при любых значениях аргументов, если  $a_i = -b_i$ . В данном случае два канала компенсируют любые возмущения переменных.

Основываясь на определении положения элементов системы в многомерном векторном пространстве, можно сделать еще одно простое, но не менее важное обобщение через скалярное произведение векторов.

$$(a, b) = |a||b| \cos \varphi, \quad (7)$$

$$\cos \varphi = \frac{(a, b)}{|a||b|}. \quad (8)$$

При  $\cos \varphi = 0$  отсутствует двухканальная компенсация, при  $\cos \varphi < 0$  – компоненты взаимодополняют друг друга, компенсация работает лишь частично, при  $\cos \varphi = -1$ , компоненты полностью компенсируют друг друга, при  $\cos \varphi > 0$  – неполная инвариантность за счет многосвязности, а при  $\cos \varphi = 1$  – система полностью не инвариантна.

Принцип компенсирующих связей был использован при исследовании хвойно-широколиственные сообществ Дальнего Востока в работах Пузаченко и Скулкина (Пузаченко, Скулкин, 1972; Скулкин, 1979). Ими было показано, что три вида хвойных пород деревьев попарно компенсируют друг друга, то есть при всех комбинациях два вида взаимокompенсируются, а третий встречается в виде подроста с высоким обилием: ель аянская и кедр корейский являются взаимодополняющими, а им противопоставляется пихта белокорая, поэтому в реальных биоценозах будут встречаться сочетания пихты с елью или пихты с кедром. В целом, хвойно-широколиственные леса юга Дальнего Востока характеризуются средней степенью инвариантности, то есть они являются устойчивыми, но существуют возмущения, которые способны привести к смене состояния системы. В цитируемых работах показано, что принцип многоканальной компенсации возмущения из внешней среды можно считать одним из главных способов, способствующих инвариантности основных функций биоценозов и фитоценозов.

Данные принципы дают общий подход к исследованию инвариантности системы, образованной множеством элементов. В частности, общую оценку инвариантности можно получить, вычислив определитель квадратной матрицы, состоящий из всевозможных скалярных векторных произведений коэффициентов при аргументах функций  $F_1, F_2, \dots, F_n$ . Однако, оценить и исследовать инвариантность некоторой системы можно и не обращаясь к анализу отношений между коэффициентами частных функций. Если аргументы независимы, то величины коэффициентов корреляции между состояниями любой пары элементов отражают ту же зависимость, что и скалярные

векторные произведения, вычисленные для той же пары. Если вид зависимости функции от входных переменных неизвестен, то оценку инвариантности и исследование масштабов взаимокompенсации элементов к неизвестному множеству возмущений можно осуществить на основе матрицы парных коэффициентов корреляции. Если коэффициент корреляции между двумя элементами отрицательный, то эти элементы, скорее всего, находятся в существенно компенсаторных отношениях; если равны нулю, то элементы линейно независимы и инвариантность системы обеспечивается на данном уровне за счет механизма многосвязности. Если коэффициенты корреляции положительные, то данная пара элементов не увеличивает, а снижает инвариантность. Чем больше в системе отрицательных и нулевых значений парных коэффициентов корреляции, тем она более инвариантна. Общей оценкой инвариантности системы может быть определитель корреляционной матрицы. Если в матрице большое значение имеют коэффициенты корреляции близкие к нулю, то переход от одних сочетаний элементов к другим в пространственно-временных координатах, в которых организована выборка, постепенный; если же большое значение имеют отрицательные коэффициенты, то – дискретный. Возможна и энтропийная оценка инвариантности:

$$R = 1 - H(Y_1, Y_2 \dots Y_n) / [H(Y_1) + H(Y_2) + \dots + H(Y_n)]. \quad (9)$$

Если  $R = 0$ , то система инвариантна в смысле высокой многосвязности, так как все элементы и все их комбинации независимы. Оценка на основе матрицы корреляции не учитывает нелинейных и неаддитивных отношений, но зато хорошо выделяет взаимокompенсирующие элементы. Сочетание этих оценок позволяет дать более полное представление о степени и характере инвариантности системы к произвольному множеству возмущений.

Если некоторая функция системы по линии обратной связи поддерживает такое сочетание элементов, при котором достигается наибольшая ее инвариантность, то такая система будет автоматически поддерживать на фоне внешних возмущений свою оптимальную в смысле инвариантности структуру. Войдя случайно в инвариантное состояние, система будет находиться в нем сколь угодно долго, и только экстраординарные возмущения могут привести ее к резкой перестройке. Именно такого рода отношения в значительной степени определяют возможность выделения некоторых относительно дискретных пространственно-временных образований, сохраняющих определенное постоянство своей структуры на фоне неизбежных внешних возмущений.

Таким образом, согласно Ю.Г. Пузаченко (1983), инвариантность – это результат двух ти-

пов отношений: многосвязности и многоканальной компенсации. В отношении реальных природных систем можно утверждать, что в них одновременно представлены все формы обеспечения инвариантности. Представим себе некоторый процесс, при котором система изменяет свое функционирование и структуру под воздействием изменяющихся внешних условий среды. Этот процесс изменений характеристик систем прекратится, как только будет найдена такая структура, которая обеспечит неизменное функционирование и неизменность самой системы к широкому диапазону внешних условий. Обеспечение инвариантности системы через многоканальность, при которой элементы выступают как дополняющие и уравнивающие друг друга, приводит, в частности, к пространственной дискретности геосистем при малой площади переходных областей. Обеспечение инвариантности за счет многосвязности и линейной независимости элементов, напротив, предопределяет континуальность. При этом дискретность проявляется в одних свойствах систем, а континуальность в других. Можно сказать, что один принцип инвариантности обеспечивает существование однородной в пространственно-временных координатах части системы (аттрактора), с постоянной структурой, а другой осуществляет объединение этих частей в непрерывное целое, которое, в свою очередь, обладая собственными компенсирующими механизмами, является относительно однородной частью еще большей системы.

Дальнейшее развитие рассматриваемый подход к оценке инвариантности получил уже в 2000-е годы. Новым стимулом к его развитию послужили развитие теоретико-методологической базы исследования сложных систем – синергетики, в частности последние работы Г. Хакена (2001), развитие средств статистической обработки данных (компьютеры и статистические программы) и появление достаточного для анализа объема мультимедийных данных дистанционного зондирования. Существование системы измерения отраженной солнечной радиации в различных спектральных каналах позволило рассматривать серии съемочных сцен в качестве набора временных срезов, фиксирующих состояния динамической геосистемы. Таким образом, появилась возможность рассматривать многолетнюю динамику каждого элемента системы (элементарной ячейки территории, пикселя) в системе постоянных координат поглощенной/отраженной солнечной энергии и теплового потока в каждом канале и/или наборе термодинамических переменных и/или спектральных индексов, характеризующих функционирование геосистемы. Первые результаты выделения инварианта на этой методологической основе были опубликованы в (Сандлерский, 2007; Сандлерский, Пузаченко, 2007). В этих работах

рассмотрены инварианты термодинамических характеристик преобразования ландшафтом солнечной энергии, рассчитанных по серии сцен мультиспектральной съемки Landsat 5, 7 с разрешением  $30 \times 30$  м в пикселе. Статья Ю.Г. Пузаченко (2010) посвящена выделению инвариантов в варьировании глобальных среднемесячных температур с разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  за период с 1902 по 2002 г. В этих работах практически сформулированы основные положения теоретико-методологического подхода к выделению инвариантов ландшафта, как динамической системы. Процесс – это смена состояний определенного пикселя, пространственно-временной процесс – смена состояний во всех точках (пикселях) территории исследования (Пузаченко, 2010). Порядок в смене состояний в пространстве определяет структуру. Движение точки в пространстве измеренных переменных определяется сменой состояний этого пикселя во времени. С помощью съемочных систем спутников и дронов можно фиксировать состояния траекторий, которые пересекают поверхность (сечение Пуанкаре). Так как рассматриваемые переменные имеют разную инертность, то есть скорость изменения, порождаются сходящиеся и расходящиеся траектории, иерархически вложенные друг в друга. Процесс эволюции определяется механизмами преобразования вещества и энергии, в общем случае физическими причинами. Система уравнений, описывающих данные механизмы, определяет динамическую систему, например, классическая модель тепло-массообмена Лоренца. Параметр порядка описывается каждым из уравнений. Таким образом, инварианты (параметры порядка) – это процессы, которые можно рассматривать как ортогональные координаты движущейся в фазовом пространстве точки. Согласно принципам синергетики, существуют и управляющие переменные, которые оказывают влияние на параметры порядка, например, естественные смены растительности, климат, рельеф и т.д. (Пузаченко, 2010).

#### МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ СЦЕН СПУТНИКОВЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Проблема выделения инвариантного состояния ландшафта на основе мультиспектральной съемки в частном случае может иметь решение в объединении различных каналов и/или сцен с последующим расчетом интегрального, или эталонного изображения. При этом такое отображение должно быть свободно от артефактов съемочной системы (искажения, облачность) и максимально информативным.

Анализ литературы показал, что существуют разные подходы к выделению интегрального

изображения по космическим снимкам в зависимости от задач, для которых они рассчитываются.

Во-первых, “*image compositing*” – компоновка изображений, построение составного безоблачного изображения с целью уменьшения объема данных спутниковой информации и минимизации атмосферного влияния. Алгоритмы для расчета преимущественно проработаны для снимков с низким пространственным разрешением, например, для AVHRR (Holben, 1986) и MODIS (Luo et al., 2008), однако существуют исследования, реализованные и для съемки Landsat (Griffiths et al., 2013; Potapov et al., 2011; Roy et al., 2010; White et al., 2014; Zhu et al., 2015). Первый алгоритм для Landsat был разработан в (Roy et al., 2010), он применялся к изображениям, полученным съемочной системой ETM+ (Landsat 7) для всей территории США. Метод основывается на совместном использовании максимальных значений нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) и яркостной температуры (Brightness temperature). Однако уже через год Потапов с соавт. (Potapov et al., 2011) предложил использовать медианные значения ближнего инфракрасного канала (NIR) в качестве критерия для отбора “идеальных” наблюдений вместо максимального NDVI. Дальнейшие исследования методов построения комбинированного изображения связаны с разработкой бальной системы оценивая снимков Landsat. Например, в (Griffiths et al., 2013) авторы предложили оценивать каждое наблюдение со спутника, а компоновку изображения осуществлять на основе взвешенных баллов. В данном подходе основными критериями можно считать дату (год и день в году), расстояние каждого пикселя от облака (из Fmask) (Griffiths et al., 2013). Дополнительные критерии предложили авторы работы (White et al., 2014), по их мнению, дополнительно нужно учитывать тип датчика, расстояние от пикселя до тени облака и непрозрачность атмосферы (из LEDAPS). Некоторые авторы использовали безоблачные снимки Landsat для оценки серии временных данных для каждого пикселя и канала и показали возможность с их помощью прогноза ежедневных синтетических данных Landsat при условии чистого неба (Zhu et al., 2015).

Во-вторых, “*image fusion*” – слияние изображений с целью улучшения пространственного разрешения (Коберниченко, Тренихин, 2007). Можно выделить несколько основных методов получения интегрального изображения: метод главных компонент (*Principle component analysis*, PCA) (Campbell and Congalton, 2012; Cao et al., 2003; Chang and Yoon, 2003; Kwarteng and Chavez, 1989; Metwalli et al., 2010; Naidu and Raol, 2008; Riasati and Zhou, 2005; Shahdoosti and Ghassemian, 2012), преобразование интенсивность–оттенок–насыщенность (*Intensity–hue–saturation*, IHS) (Choi, 2006; Tu et al., 2001a, 2001b), преобразование Брови (*Brovey transform*),

вейвлет-преобразование (*Wavelet transform*) (Naidu and Raol, 2008; Nunez et al., 1999) и т.д. Данные методы, как правило, используются для объединения мультиспектральных и панхроматических каналов с целью получения цветного изображения с высоким разрешением. Метод главных компонент применяется к временным сериям снимков Landsat с одинаковым разрешением для всех исходных каналов совместно, с выделением общих компонент, характеризующих 2–3 показателя: яркость, зеленость (Ingebritsen and Lyon, 1985), влажность (Campbell and Congalton, 2012).

Рассмотренные методы хоть и предназначены для слияния изображений, уменьшения признакового пространства, но не совсем подходят для выделения инвариантов в контексте сложных динамических систем. В работах Пузаченко, Кренке, Сандлерского и др. (Пузаченко, 2010; Пузаченко и др., 2019; Кренке и др., 2019) показано, что методы оценки параметров порядка прямо связаны с алгебраическими моделями снижения размерности: методом главных компонент, факторным анализом, многомерным шкалированием, кластер-анализом, дискриминантным анализом. Они широко применяются в экологии, географии, экономике и социологии, где чаще всего используются для отображения положения переменных в пространстве ортогональных векторов конечной размерности. Преобразование векторного пространства в пространство Евклида позволяет вычислить численные значения этих координат. Все исходные (подчиненные) переменные описываются от этих координат через линейные или нелинейные уравнения регрессии со специфическими параметрами. Формально получаем преобразование исходных переменных с очень большой размерностью в пространство со значительно меньшей размерностью при минимальной потере информации, что возможно, так как между переменными – функциями общих параметров – неизбежно существуют корреляции, отличные от нуля. Кластерам с наиболее коррелированными переменными соответствуют свои собственные параметры порядка.

Алгебраические процедуры снижения размерности и представления множества измеренных переменных как линейных функций обычно очень небольшого числа параметров порядка сами по себе не дают никаких оснований для их физической интерпретации. Однако практика анализа различных явлений природы показывает, что этот смысл идентифицируется как через переменные, включенные в анализ, так и через внешние переменные, функционально связанные с исследуемым явлением (Пузаченко, 2010). Так, наиболее подходящим для выделения инвариантов (параметров порядка) является метод главных компонент (факторный анализ). Процедура выделения факторов сводится к вращению, макси-

**Таблица 1.** Результаты обобщения шести каналов для каждого срока съемки, безоблачные сцены Landsat 4–9

№	Дата съемки (дд/мм/гг)	Доля общей дисперсии главных компонент снимков			Сумма дисперсий
		яркость всех каналов	яркость БИК канала	яркость КИК каналов	
1	04/02/87	0.74	0	<b>0.20</b>	0.94
2	06/06/88	0.76	<b>0.19</b>	0.03	0.98
3	03/05/90	0.89	<b>0.08</b>	0.02	0.99
4	27/04/00	0.88	<b>0.08</b>	0.03	0.99
5	27/09/00	0.80	<b>0.08</b>	0.07	0.95
6	22/03/01	0.96	0	<b>0.03</b>	0.99
7	10/04/02	0.63	0.03	<b>0.32</b>	0.98
8	20/06/02	0.80	<b>0.16</b>	0.02	0.98
9	11/02/07	0.96	0	<b>0.03</b>	0.99
10	03/06/07	0.75	<b>0.17</b>	0.04	0.96
11	17/02/15	0.68	0	<b>0.31</b>	0.99
12	23/03/16	0.93	0	<b>0.06</b>	0.99
13	06/02/17	0.85	0	<b>0.13</b>	0.98
14	14/04/18	0.67	0.07	<b>0.26</b>	1
15	17/04/19	0.79	0.08	<b>0.12</b>	0.99
16	04/06/19	0.79	<b>0.17</b>	0.03	0.99
17	26/09/20	0.83	<b>0.08</b>	0.06	0.97
18	17/02/21	0.95	0	<b>0.05</b>	1
19	24/03/22	0.86	0	<b>0.14</b>	1

мизирующему 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. 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 изменчивости (дисперсии).

#### ВЫДЕЛЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИНВАРИАНТОВ ОТРАЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В КАНАЛАХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ LANDSAT 4–9

**Территория и материалы исследований.** Апробация метода выделения инвариантов отражения была выполнена для южно-таежного ландшафта юга Валдайской возвышенности (Центрально-Лесной государственный биосферный заповедник и прилегающей территории). Исследование проводится в прямоугольнике с координатами углов: 32.607781 в.д., 56.682393 с.ш.; 33.230169 в.д., 56.682798 с.ш.; 32.611149 в.д., 56.354927 с.ш.; 33.228192 в.д., 56.355327 с.ш. и общей площадью 139 200 га.

В качестве исходных данных были использованы все безоблачные сцены Landsat 4–9 для исследуемой территории. В результате, используются все основные каналы (синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный (БИК) и два коротковолновых инфракрасных (КИК) для 19 сцен (табл. 1), выполненных с 1987 по 2022 г. (5 за февраль, 3 за март, 4 за апрель, 1 за май, 4 за июнь и 2 за сентябрь). Данные дальнего(их) ИК каналов были исключены из анализа, так как для многих сроков они имеют артефакты в виде полос, что исключает возможность их совместного анализа с остальными каналами. Также не используются дополнительные относительно Landsat 4–7 каналы съемки Landsat 8–9.

В качестве информации для интерпретации выделяемых инвариантов использованы морфометрические характеристики рельефа (уклон, освещенность с запада и юга, профильная, плановая, продольная и кросс-секционная выпуклость, минимальная и максимальная кривизна, оператор Лапласа), рассчитанные для разных иерархических уровней (Пузаченко и др., 2002) на основе данных SRTM<sup>1</sup> и 1882 геоботанических описания, выполненных с 1993 по 2019 г.

**Методы.** Выделение инвариантов производилось в несколько этапов. На первом – методом главных компонент выполнено обобщение каналов для каждого срока съемки с выделением глав-

<sup>1</sup> Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>

**Таблица 2.** Результаты интеграции компоненты яркости всех каналов каждого срока съемки, безоблачные сцены Landsat 4–9

Дата (дд/мм/гг)	Факторные нагрузки компоненты яркости всех каналов
	частный инвариант
04/02/87	0.83338
06/06/88	0.76779
03/05/90	0.75210
27/04/00	0.80826
27/09/00	0.86436
22/03/01	0.89288
10/04/02	0.38077
20/06/02	0.82572
11/02/07	0.92588
03/06/07	0.84626
17/02/15	0.91723
23/03/16	0.92830
06/02/17	0.90709
14/04/18	0.68339
17/04/19	0.84035
04/06/19	0.80442
26/09/20	0.80018
17/02/21	0.84226
24/03/22	0.81234
<b>Собственные значения</b>	12.80322
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.67385

ных компонент снимков. Число компонент, остающихся в анализе, определяется на основе факторных нагрузок (ФН) каналов съемки таким образом, чтобы все максимальные факторные нагрузки каналов отражались в выделяемых компонентах, а также сохранялись компоненты имеющие относительно высокие ФН с отдельными диапазонами спектра.

На следующем этапе главные компоненты снимков обобщаются методом главных компонент по всем срокам съемки согласно их связи с исходными каналами определяемой на основе ФН. В анализе остаются главные компоненты, имеющие высокие ФН с большинством сроков съемки, либо имеющие сезонную составляющую и долю описания варьирования (собственное значение) больше 1. Полученные главные компоненты, соответствующие заявленным критериям, обозначаются как частные инварианты.

Заключительным этапом расчета инвариантов является выделение общих инвариантов на основе интеграции частных инвариантов методом главных компонент. На этом этапе выделяются главные компоненты, имеющие максимальные ФН для двух и более частных инвариантов, а также, при невыполнении первого условия, имеющих важное функциональное значение для дан-

ной территории, что определяется на экспертном уровне. Рассчитываемые на этом этапе главные компоненты рассматриваются как общие инварианты отражения каналов дистанционной съемки за весь период.

Независимая интерпретация полученных общих инвариантов проводилась от характеристик рельефа для всей территории, от характеристик растительности на основе полевых данных и от характеристик рельефа и растительности совместно с помощью мультирегрессионного анализа на основе значений исправленного R<sup>2</sup>.

**Результаты.** Для снежного периода (февраль–март) выделяется две компоненты для всех каналов: первая – яркость всех каналов, вторая – яркость в КИК каналах (см. табл. 1). Для бесснежного периода выделяется 3 компоненты снимка: первая – яркость всех каналов, вторая и третья – яркость в БИК и в КИК каналах, однако их вклад в описание варьирования различается в зависимости от сезона. Для первой–второй декады апреля характерен высокий вклад в описание варьирования каналов съемки яркости КИК каналов, относительно БИК канала. В конце апреля–мае начинает преобладать в описании варьирования отражение в БИК канале, относительно КИК каналов, а в июне эта тенденция усиливается. В конце сентября вклад в описание всех каналов становится практически равным для с КИК и БИК канала.

Таким образом, исходя из общей физической интерпретации каналов съемки, где общая яркость всех каналов отражает запасы фитомассы, БИК канал чувствителен к содержанию хлорофилла и, соответственно, активности фотосинтеза, а КИК каналы слабее отражаются водой, относительно остальных, прослеживается сезонная смена состояний ландшафтного покрова, от открытого снегом с отсутствием вегетации и различным влагосодержанием, определяемым конкретными погодными условиями, через начало вегетации при активном таянии снега и высоком влагосодержании территории до летнего – с высокой вегетативной активностью растительного покрова при снижении влагосодержания территории и к паритету к концу сентября между вегетационной активностью и влагосодержанием, при их общем небольшом вкладе в описание варьирования всех каналов. В целом, 2–3 компоненты для шести каналов съемки Landsat описывают от 94 до 100% варьирования всех каналов, что говорит о практическом отсутствии потери информации при снижении размерности снимка.

При интеграции компонентов яркости всех каналов (табл. 2) получено, что первый частный инвариант положительно связан практически со всеми сроками съемки максимальными ФН и описывает 67% варьирования первой компоненты всех сроков съемки (рис. 1). Исключение со-



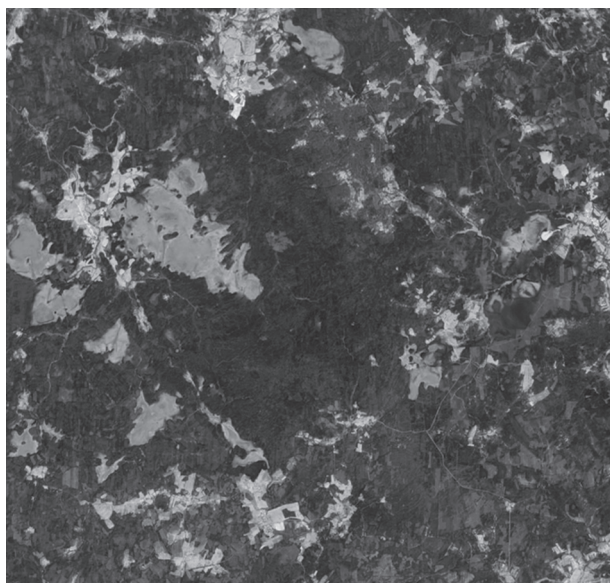


Рис. 1. Частный инвариант яркости всех каналов, Центрально-Лесной заповедник.

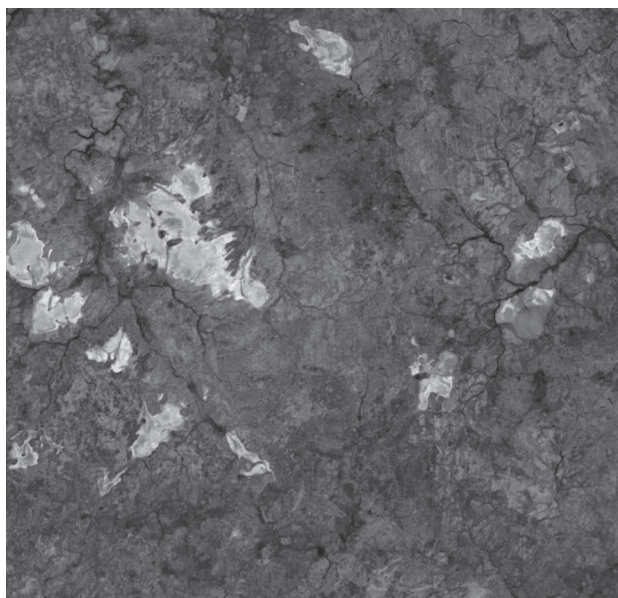


Рис. 2. Частный сезонный инвариант ближнего ИК канала, Центрально-Лесной заповедник.

ставляет съемка 10 апреля 2002 г., которая в большей степени связана со второй компонентой, описывающей 10% общего варьирования. Для компонент общей яркости выделяется один частный инвариант, описывающий интегральную яркость всех каналов за все сроки съемки, высокими значениями выделяющий участки с низкой надземной фитомассой, и, соответственно, наоборот.

Интеграция компонент БИК канала для всех сроков съемки показала (табл. 3), что первый частный инвариант положительно определяется

максимальными ФН для снимков первой–второй декады апреля и 27 сентября 2000 г. и отрицательно – для снимков июня, кроме 6 июня 1988 г., при описании 41% от общего варьирования компонент БИК канала (рис. 2). Второй частный инвариант имеет положительные ФН со всеми сроками съемки при максимальных ФН для снимков от 26 сентября 2020 г., 3 мая 1990 г., 27 апреля 2000 г. и 6 июня 1988 г., при описании 23% общего варьирования (рис. 3). Третья компонента описывает 11% общего варьирования и не имеет значи-

Таблица 3. Результаты интеграции компоненты БИК канала

Дата (дд/мм/гг)	Факторные нагрузки компоненты БИК канала	
	частный сезонный инвариант	частный инвариант
06/06/88	–0.535859	<b>0.558682</b>
03/05/90	0.282146	<b>0.586703</b>
27/04/00	0.409405	<b>0.579390</b>
27/09/00	<b>0.711403</b>	0.390996
10/04/02	<b>0.811353</b>	0.304654
20/06/02	– <b>0.669391</b>	0.577144
03/06/07	– <b>0.753309</b>	0.457787
14/04/18	<b>0.797207</b>	0.238260
17/04/19	<b>0.845519</b>	0.225776
04/06/19	– <b>0.669977</b>	0.513461
26/09/20	0.110937	<b>0.591795</b>
<b>Собственные значения</b>	4.525929	2.502002
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.411448	0.227455

Примечание. Максимальные факторные нагрузки для каждого срока съемки обозначены полужирным шрифтом.

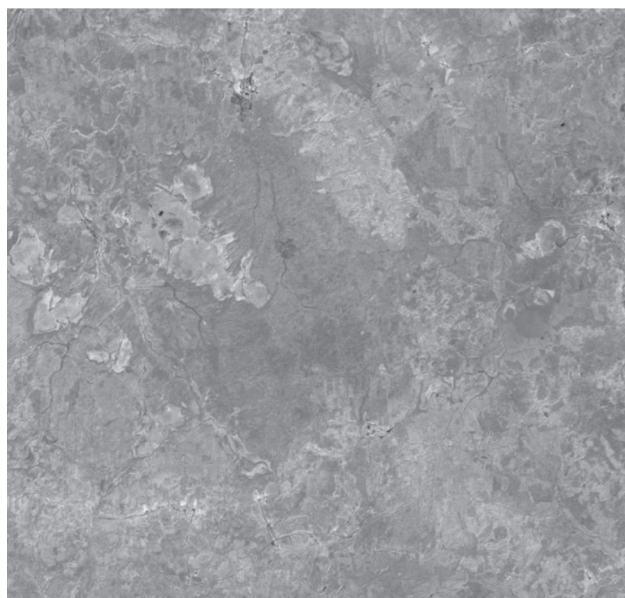


Рис. 3. Частный инвариант ближнего ИК канала, Центрально-Лесной заповедник.

мых ФН с компонентами БИК канала, описывая варьирование БИК канала 26 сентября 2020 г. и 3 мая 1990 г.

Таким образом, для компонент БИК канала выделяется частный сезонный инвариант, определяющий положительными значениями высокую интенсивность вегетации, в первую очередь в начале апреля и низкую летом и наоборот, отрицательными – высокую интенсивность вегетации летом и низкую в начале апреля, а также частный инвариант, положительно определяемый компонентами БИК канала за все сроки съемки, которые вместе описывают 64% общего варьирования ближнего ИК канала.

При интеграции компонент КИК каналов за все сроки съемки первый частный инвариант описывает 29% варьирования при значимых положительных ФН практически со всеми сроками съемки, кроме первой–второй декады апреля, и их максимуме для сроков со снежным покровом (табл. 4). Вторым частным инвариантом описывает 15% варьирования и максимально положительно

Таблица 4. Результаты интеграции компоненты КИК каналов

Дата (дд/мм/гг)	Факторные нагрузки компоненты КИК каналов		
	частный инвариант	частный сезонный инвариант	частный инвариант первой–второй декады апреля
04/02/87	<b>0.520613</b>	-0.122915	-0.318505
06/06/88	0.333116	<b>0.637648</b>	0.041285
03/05/90	<b>0.582115</b>	0.419630	0.024473
27/04/00	<b>0.506982</b>	0.437316	0.161197
27/09/00	<b>0.446577</b>	0.298440	0.108856
22/03/01	<b>0.568539</b>	-0.311051	-0.188139
10/04/02	-0.057494	<b>-0.457748</b>	<b>0.704343</b>
20/06/02	0.278043	<b>0.453793</b>	0.190542
11/02/07	<b>0.694392</b>	-0.327500	-0.143224
03/06/07	0.397401	<b>0.449149</b>	0.139908
17/02/15	<b>0.857079</b>	-0.278321	-0.089286
23/03/16	<b>0.818790</b>	-0.157741	-0.182876
06/02/17	<b>0.831144</b>	-0.243879	-0.121053
14/04/18	-0.003864	-0.393397	<b>0.789880</b>
17/04/19	0.288102	-0.301763	<b>0.665482</b>
04/06/19	0.433405	<b>0.534643</b>	0.243097
26/09/20	0.418258	0.433313	<b>0.450820</b>
17/02/21	<b>0.548845</b>	-0.220755	-0.109029
24/03/22	<b>0.694933</b>	-0.446638	0.071862
<b>Собственные значения</b>	5.547042	2.828772	2.151703
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.291950	0.148883	0.113248

Примечание. Максимальные факторные нагрузки для каждого срока съемки обозначены полужирным шрифтом.

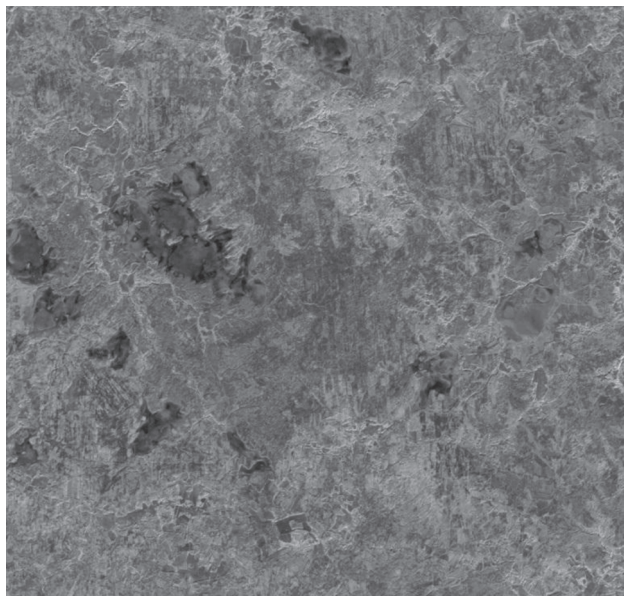


Рис. 4. Частный инвариант средних ИК каналов, Центрально-Лесной заповедник.

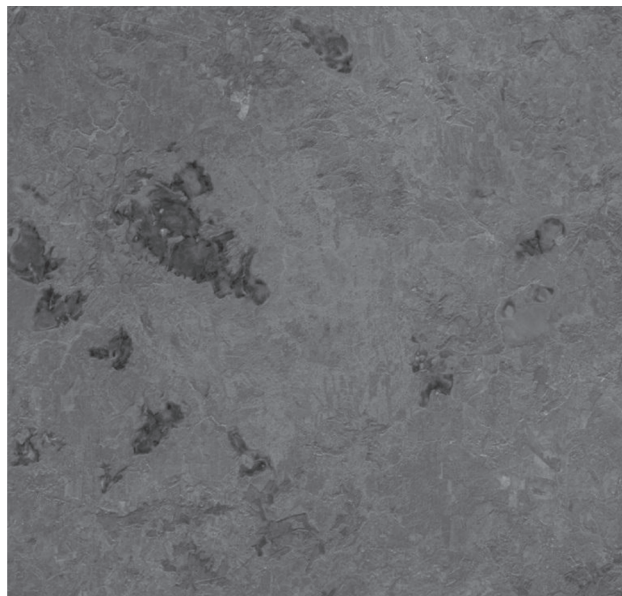


Рис. 5. Частный сезонный инвариант средних ИК каналов, Центрально-Лесной заповедник.

связан с летними, а также бесснежными сроками съемки, за исключением первой–второй декады апреля, и отрицательно со всеми остальными сроками съемки. Третий частный инвариант описывает 11% варьирования и имеет максимальные положительные связи со снимками первой–второй декады апреля, а также с 26 сентября 2020 г., с остальными сроками съемки значимых ФН нет. Четвертая компонента описывает 6% варьирования и имеет высокие положительные ФН с 3 июня 2007 г., 20 июня 2002 г. и низкий отрицательный ФН с 27 сентября 2000 г.

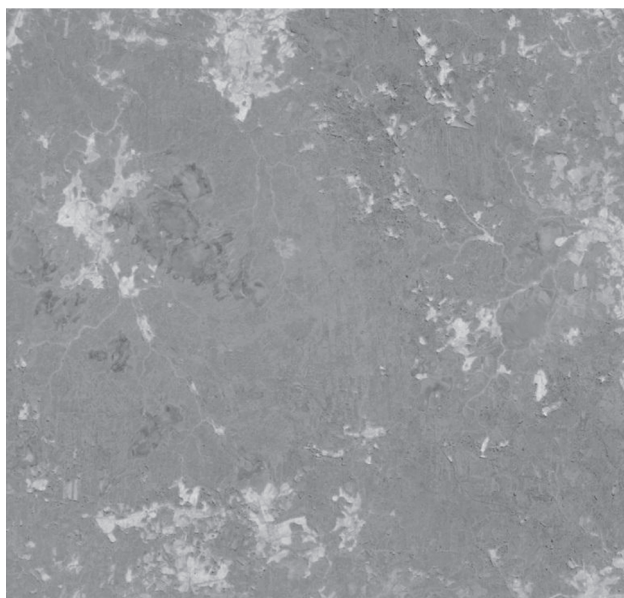
Согласно принятым критериям, для компонент КИК каналов выделяются частный инвариант положительно определяемый большинством компонент КИК каналов за все сроки съемки, кроме первой–второй декады апреля (рис. 4), и частный сезонный инвариант, высокими положительными значениями выделяющий слабо обводненные территории, в первую очередь летом при их относительно высоком обводнении в снежный период и наоборот, низкими отрицательными значениями сильно обводненные территории летом при их относительно низком обводнении зимой (рис. 5). Таким образом, уникальные условия первой–второй декады апреля, характеризующие начало вегетации при очень высоком влагосодержании большинства территорий в результате снеготаяния, лишь частично описываются частным сезонным инвариантом. Поэтому было решено оставить в анализе частный инвариант первой–второй декады апреля (рис. 6), как имеющий значительный вклад в описание общего варьирования и важное семантиче-

ское значение с точки зрения характеристики ландшафтного покрова в период весеннего снеготаяния, выделяя территории первыми лишаящиеся снежного покрова. В результате, три частных инварианта КИК каналов описывают 55% их исходного варьирования.

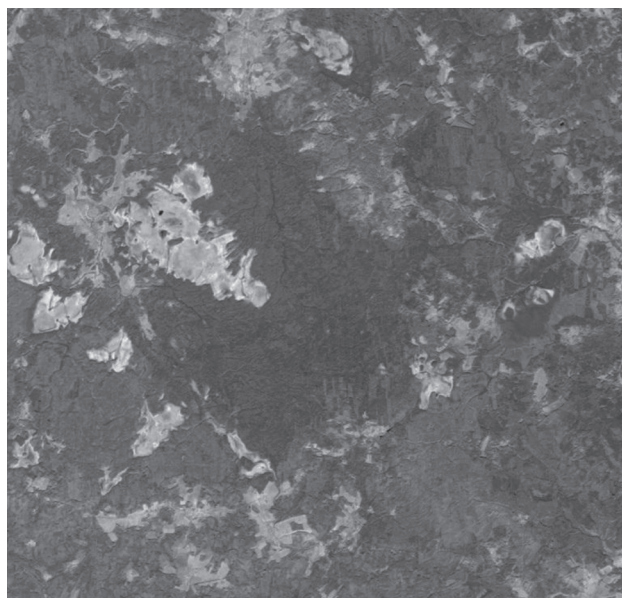
В результате интеграции компонент снимков выделено 6 частных инвариантов, описывающих общие закономерности отражения и его сезонного хода для всех рассматриваемых каналов и сроков съемки: 1) инвариант яркости всех каналов, 2) сезонный инвариант БИК канала, 3) инвариант БИК канала, 4) инвариант КИК каналов, 5) сезонный инвариант КИК каналов и 6) инвариант КИК каналов апреля.

Первый общий инвариант имеет максимальный положительный ФН с частными инвариантами общей яркости и БИК канала и отрицательный – с частным сезонным инвариантом КИК каналов, описывая 33% варьирования (табл. 5). Второй общий инвариант имеет максимальный положительный ФН с частным инвариантом КИК каналов и отрицательный – с частным сезонным инвариантом БИК канала, описывая 29% варьирования. Третий общий инвариант имеет максимальный положительный ФН с частным инвариантом КИК каналов первой–второй декады апреля, а также значимый отрицательный ФН с частными инвариантами ИК каналов, описывая 20% варьирования.

Таким образом, первый общий инвариант (рис. 7) высокими положительными значениями выделяет территории с высоким отражением, сильно обводненные летом, при их относительно



**Рис. 6.** Частный инвариант средних ИК каналов в первой–второй декадах апреля, Центрально-Лесной заповедник.



**Рис. 7.** Первый общий инвариант, Центрально-Лесной заповедник.

низком обводнении зимой, и высокой интенсивностью вегетации и напротив, низкими отрицательными значениями – территории с низким отражением слабо обводненные летом, при их относительно сильном обводнении зимой и низкой интенсивностью вегетации.

Второй общий инвариант (рис. 8) высокими положительными значениями выделяет слабо обводненные территории с высокой интенсивностью вегетации летом и низкой в начале апреля и наоборот, низкими отрицательными – сильно обводненные территории с низкой интенсивностью вегетации летом и высокой в начале апреля.

Третий общий инвариант (рис. 9) высокими положительными значениями выделяет территории, наименее обводненные в начале апреля с относительно низкой интенсивностью вегетации и относительно сильно обводненные в течение года и наоборот, низкими отрицательными значениями – наиболее обводненные в начале апреля с относительно высокой интенсивностью фотосинтеза и относительно низко обводненные в течение года.

В результате, три общих (интегральных) инварианта описывают 82% варьирования частных инвариантов общей яркости всех каналов съемки, БИК и КИК каналов и, таким образом, около половины исходного варьирования, всех каналов

**Таблица 5.** Результаты интеграции частных инвариантов

Частный инвариант	Факторные нагрузки частных инвариантов		
	первый общий инвариант	второй общий инвариант	третий общий инвариант
Общая яркость	<b>0.840645</b>	0.114280	0.329929
Сезонный ближнего ИК канала	0.246959	<b>-0.893927</b>	-0.085403
Ближнего ИК канала	<b>0.678433</b>	0.254471	-0.459837
Средних ИК каналов	0.011686	<b>0.836600</b>	-0.393373
Сезонный средних ИК каналов	<b>-0.779216</b>	0.218272	0.274220
Средних ИК каналов за первую–вторую декады апреля	0.336287	0.334112	<b>0.814722</b>
<b>Собственные значения</b>	1.948346	1.736094	1.221308
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.324724	0.289349	0.203551

*Примечание.* Максимальные факторные нагрузки для каждого частного инварианта обозначены полужирным шрифтом.

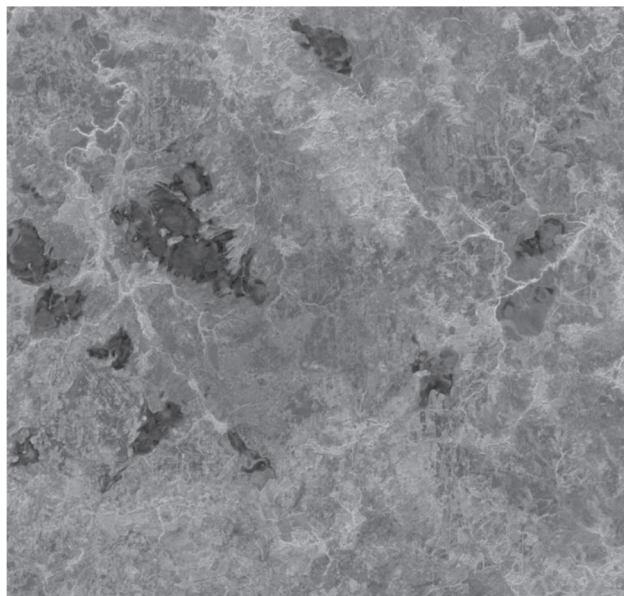


Рис. 8. Второй общий инвариант, Центрально-Лесной заповедник.

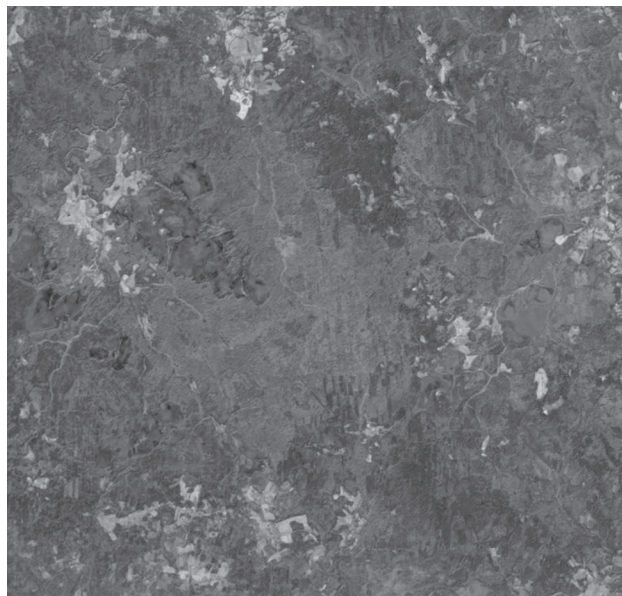


Рис. 9. Третий общий инвариант, Центрально-Лесной заповедник.

для всех сроков съемки (114 переменных), может быть представлено через три ортогональных интегральных переменных.

Для всей территории вклад характеристик рельефа в описание варьирования инвариантов низкий и только для второго инварианта он более значим с  $R^2$  равным 0.28 при ведущем вкладе уклонов рельефа, его кривизны для уровней 150–1300 м, а также его макроэкспозиций (табл. 6).

Мультирегрессионный анализ описаний растительности с общими инвариантами показал достаточно высокий уровень их связи при исправленном  $R^2$  – 0.4–0.5 для первых двух инвариантов и 0.26 для третьего. Основными, связанными с инвариантами, выступают характеристики древостоя в целом и таких пород, как ель, береза, ольха серая, клен, рябина, общие проективные покрытия трав и мхов, проективное покрытие видов травяно-кустарничкового яруса характерное для различных экотопов.

При совместном описании инвариантов от характеристик рельефа и описаний растительности уровень описания повышается, при этом наиболее значимые характеристики рельефа и описаний растительности входят и в совместную модель. Для первого инварианта  $R^2$  составляет 0.53 при положительной связи с суммой площадей сечения древостоя, проективным покрытием видов наземного яруса характерных для верховых болот, вторичных мелколиственных лесов, лугов и залежей, уклонами рельефа со средним линейными размерами 450 м и выпуклостью и различиями восточных и западных экспозиций с линейными

размерами около 1.3 км. Отрицательно первый инвариант определяется высотой древостоя, суммой площадей сечения ели, рябины и клена, проективным покрытием черники и подроста ели, а также минимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м.

Второй инвариант определяется от состояния растительности и характеристик рельефа на уровне  $R^2$  – 0.63 и положительно связан с проективным покрытием влажнотравья, суммой площадей сечения липы, различиями в северных и южных экспозициях рельефа с линейными размерами 450 м и около 1 км, максимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 и 450 м, суммой площадей сечения древостоя, плановой выпуклостью рельефа с линейными размерами около 2.5 км и проективным покрытием ивы. Отрицательно второй инвариант определяется проективным покрытием мхов, и видов наземного яруса характерных для верховых болот, суммой площадей сечения ели и сосны, и кросс-секционной выпуклостью рельефа с линейными размерами около 1 км.

Третий инвариант наименее связан с состоянием растительности и характеристиками рельефа и при  $R^2$  – 0.37 положительно связан с суммой площадей сечения ели и клена, максимальной кривизной рельефа с линейными размерами около 4 км, проективным покрытием лютика едкого и хвоща лугового и минимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м. Отрицательно третий инвариант определяется суммой площадей сечения березы, и древостоя в целом, проективным покрытием неморальных и болот-

**Таблица 6.** Интерпретация общих инвариантов от характеристик рельефа

Общий инвариант			
исправленный R <sup>2</sup> / ведущие переменные в анализе	Первый	Второй	Третий
Для характеристик рельефа всей территории (1546752 точек)	0.102813309/ Высота рельефа, уклон рельефа, минимальная кривизна, кросс-секционная выпуклость и освещенность с востока и юга с линейными размерами около 4 км, максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, кросс-секционная выпуклость и минимальная кривизна с линейными размерами около 1 км, максимальная кривизна с линейными размерами около 2.5 км	0.279236132/ Уклон рельефа, уклон и освещенность с юга с линейными размерами около 2.5 км, минимальная кривизна с линейными размерами 150 м, максимальная кривизна с линейными размерами 270 м, минимальная кривизна и уклон с линейными размерами 450 м, кросс-секционная выпуклость и минимальная кривизна с линейными размерами около 1.3 км, плановая выпуклость и освещенность с юга с линейными размерами около 4 км и уклон с линейными размерами около 1 км	0.0734437692/ Высота рельефа, уклон, максимальная и минимальная кривизна и кросс-секционная выпуклость с линейными размерами около 1 км, максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, оператор Лапласа, кросс-секционная выпуклость и уклон с линейными размерами около 4 км, освещенность с юга с линейными размерами около 2.5 км и освещенность с востока с линейными размерами около 1.3 км
Для характеристик растительности (1882 точки)	0.442272049/ Высота древостоя, сумма площадей сечения ели, <b>березы, ольхи серой и рябины, проективное покрытие подбела многолистного, клюквы болотной, лапчатки прямостоячей, черники обыкновенной, лютика едкого и кашубского, марьянника дубравного, подмаренника душистого, кочедыжника женского, кипрея узколистного, подроста ели, ивы и сосны, число видов подлеска, проективное покрытие трав</b>	0.497507036/ Проективное покрытие мхов и <b>трав, сумма площадей сечения ели и сосны, сумма площадей сечения и высота древостоя, проективное покрытие подбела многолистного, клюквы болотной, черники обыкновенной, луговика дернистого, яснотки зеленчуковой, лапчатки прямостоячей, крапивы двудомной, бора развесистого, лютика кашубского и едкого, марьянника дубравного, звездчатки ланцетной, золотарника обыкновенного, смородины, подроста ивы, вяза, ели</b>	0.26202277/ <b>Сумма площадей сечения ели, клена, сумма площадей сечения и высота древостоя, проективное покрытие подмаренника душистого, крапивы двудомной, лютика едкого, клюквы болотной, копытня европейского, недотроги обыкновенной, сердечника, бора развесистого, щитовника букового, подроста ели, проективное покрытие мхов</b>

Таблица 6. Окончание

Общий инвариант	Первый	Второй	Третий
исправленный R <sup>2</sup> / ведущие переменные в анализе			
Для характеристик рельефа и раститель- ности совместно (1882 точки)	0.525320825/ Высота и <b>сумма площадей сечения древостоя</b> , сумма площадей сечения ели, рябины, клена, проективное покрытие <b>подбела многолистного, клюквы болотной, лютика едкого, марьяника дубравного</b> , черники обыкновенной, подрост ели, <b>уклон с линейными размерами 450 м</b> , минимальная кривизна с линейными размерами 150 м, <b>кросс-секционная выпуклость и освещенность с востока с линейными размерами около 1.3 км</b>	0.626886327/ Проективное покрытие мхов, проективное покрытие клюквы болотной, подбела многолистного, <b>крапивы двудомной, луговика дернистого, лапчатки прямостоячей</b> , сумма площадей сечения ели, <b>липы, сосны, освещенность с юга</b> и кросс-секционная выпуклость с линейными размерами около 1 км, <b>максимальная кривизна с линейными размерами 150 м, сумма площадей сечения древостоя, плановая выпуклость с линейными размерами около 2.5 км, освещенность с юга и максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, проективное покрытие подрост ивы</b>	0.372848784/ Сумма площадей сечения березы, <b>ели, клена</b> и древостоя, <b>максимальная кривизна с линейными размерами около 4 км</b> , проективное покрытие крапивы двудомной, клюквы болотной, <b>лютика едкого</b> , копытня европейского, ожики волосистой, <b>хвоща лугового, минимальная кривизна с линейными размерами 150 м</b> , минимальная кривизна и освещенность с юга с линейными размерами 270 м

ных видов наземного покрова, минимальной кривизной рельефа и различиями южных и северных экспозиций с линейными размерами 270 м.

**Обсуждение.** В отечественной школе ландшафтоведения на протяжении длительного периода времени понятие инвариант имело статическую трактовку, под ним понималась некая вертикальная или горизонтальная структура ландшафта, обусловленная геоморфологической основой. По мере развития представлений о ландшафте как о сложной динамической системе и накопления мультиспектральной дистанционной информации, понятие “инвариант” стало возможным отождествить с параметром порядка системы, имеющим вполне определенный физический смысл.

В (Пузаченко и др., 2019) показано, что инварианты динамической системы тождественны параметрам порядка в синергетике, а основной метод для их расчета — метод главных компонент. Его использование относительно исходных каналов Landsat позволяет выделить несколько компонентов снимков, отражающих основные характеристики ландшафтного покрова: общую яркость, характеризующую надземную фитомассу, яркость в БИК канале, характеризующую интенсивность фотосинтеза, яркость в КИК каналах, характеризующую содержание свободной воды, и тепловой поток, при включении в анализ дальних ИК каналов.

В условиях южно-таежного ландшафта, в рамках данных МДДЗ, можно выделить два принципиально отличных периода по наличию БИК компоненты снимков: с наличием снежного покрова (февраль—март) и бесснежный (апрель—сентябрь). Также выделяется летний период (июнь), характеризующейся большей долей БИК канала относительно КИК каналов и вторая декада апреля, с большей долей КИК каналов относительно БИК канала. Для сентября характерен паритет ИК каналов. В целом выделяемые компоненты снимков описывают исходное варьирование каналов съемки минимум на 94%, таким образом, практически полностью сохраняя всю исходную информацию по каждому сроку съемки.

Обобщение компонент снимков за все сроки съемки выделяет один частный инвариант для общей яркости всех каналов съемки, что идентифицирует постоянство в отражении общей фитомассы в течении всего года, другими словами, территории с наибольшим отражением и, соответственно, с минимальной фитомассой остаются таковыми и в снежный и в бесснежный периоды, то же относится и к территориям с наименьшим отражением и наибольшей фитомассой. Таким образом, частный инвариант общей яркости описывает почти 70% варьирования общей яркости за все сроки съемки.

Обобщение компонент БИК канала, отражающего фотосинтетическую активность растительности, за все сроки съемки выделяет частные сезонный и общий инварианты, при этом сезонный имеет почти в 2 раза больший вес, чем общий. Сезонный инвариант противопоставляет активность вегетации для территорий с максимальной вегетацией в весенне-осенний период и летом. Общий инвариант БИК компонент определяет дифференциацию территории по активности фотосинтеза в течение всего вегетационного периода, особенно в период ее максимума. Таким образом, совместно, инварианты БИК канала описывают более 60% исходного варьирования компонент БИК канала снимков.

Наиболее сложная структура частных инвариантов наблюдается для КИК компоненты снимков, отражающей общее содержание свободной влаги в ландшафтном покрове. Выделяются частный инвариант, описывающий все сроки съемки, кроме первой–второй декады апреля, отражающий общее содержание влаги в течении большей части года для большей части территории, частный сезонный инвариант, выделяющий слабо обводненные территории с конца апреля по сентябрь, особенно в июне, при их сильном обводнении в весенний период и частный инвариант, описывающий содержание влаги в основном в первую–вторую декаду апреля, как особое состояние обводнения территории в период половодья. В результате, совместно частные инварианты КИК компоненты описывают около 55% варьирования компоненты КИК каналов за все сроки съемки.

Несмотря на то, что главные компоненты яркости и ИК каналов для каждого снимка являются ортогональными и, соответственно, взаимонезависимыми, результаты их обобщения по срокам съемки уже таковыми не являются. Выделяется *три общих инварианта*, при этом *первый* обобщает частный инвариант компонент общей яркости каналов, частный сезонный инвариант компонент КИК каналов и частный инвариант компонент БИК канала, таким образом отражая общую фитомассу, территории контрастные по содержанию влаги весной и летом и общую активность фотосинтеза. *Второй общий инвариант* определяется частными сезонным инвариантом компонент БИК канала и инвариантом компонент КИК каналов, выделяя территории с различными сроками наиболее активного фотосинтеза и общее содержание свободной воды территории. *Третий общий инвариант* в наибольшей степени определяется частным инвариантом компонент КИК каналов в первой–второй декаде апреля и, в меньшей степени, частным инвариантом компонент БИК канала, выделяя территории контрастные по влагосодержанию в период половодья и общую активность фотосинтеза. Совместно общие инварианты опи-

сывают около 70% варьирования инвариантов компонент снимков.

Следует отметить, что семантически близкие результаты были получены нами при выделении параметров порядка термодинамической системы ландшафта заповедника (Sandlersky and Krenke, 2020). При анализе термодинамических переменных, рассчитанных по более короткой серии съемки Landsat (1986–2009) получено три инварианта, первый из которых характеризует общее поглощение солнечной энергии в течение всего года, второй – продуктивность в течение всего вегетационного периода, а третий – продуктивность весной и осенью.

Таким образом, прослеживая семантику исходных каналов съемки в ходе их обобщения, можно определить основные различия квазистационарных состояний территории, выделяемых частными и общими инвариантами. Детализация семантической интерпретации на основе полевых геоботанических данных и характеристик рельефа позволяет конкретизировать состояния территории, определяемые общими инвариантами. Морфометрические характеристики рельефа слабо определяют варьирование общих инвариантов, из чего следует значительная независимость растительного покрова, формирующего отражение, от рельефа для большей части территории. Это подтверждается при мультирегрессионном анализе инвариантов от морфометрических характеристик рельефа и характеристик геоботанических описаний совместно, в котором ведущий вклад в модель получают характеристики растительности. В результате показано, что *первый общий инвариант*, в наибольшей степени отражающий надземную фитомассу, выделяет высокими значениями территории с низкой фитомассой, такие как верховые болотные массивы, молодые мелколиственные леса, луга и залежи. При этом для территорий с низкой фитомассой наблюдается высокая активность фотосинтеза, что характерно для лугов, залежей и молодых мелколиственных лесов и высокое влагосодержание летом, характерное для верховых болот. Низкими значениями первого общего инварианта выделяются территории с высокой фитомассой, относительно низкой интенсивностью фотосинтеза и высоким влагосодержанием весной, представляющие собой леса с преобладанием ели, особенно бореальные еловые лесами с большими запасами древостоя.

*Второй общий инвариант* наибольшими значениями выделяет территории с высокой интенсивностью фотосинтеза в летний период при их невысоком влагосодержании в течении всего года, таким образом выделяя луга и залежи, молодые и средневозрастные неморальные широколиственно-мелколиственные и мелколиственные леса, травяно-кустарниковые сообщества пойм рек. Низ-



кими значениями выделяются территории с относительно невысокой интенсивностью фотосинтеза летом при высоком влагосодержании в течение всего года, такие как верховые болотные массивы, в том числе с сосновым редколесьем, и бореальные леса с преобладанием ели.

*Третий общий инвариант*, наибольшими значениями выделяющий территории с низким влагосодержанием в период половодья и низкой интенсивностью фотосинтеза, в первую очередь выделяет луга и залежи, зарастающие вырубки, а также еловые леса. Низкими значениями выделяются территории с высоким влагосодержанием в период половодья и высокой интенсивностью фотосинтеза – верховые болота, молодые неморальные широколиственные-мелколиственные и мелколиственные леса.

Таким образом, можно констатировать, что система отражения мультиспектральных данных от деятельной поверхности земли, для исследуемой территории за последние 35 лет, определяется тремя независимыми координатами в рамках которых выделяются несколько устойчивых во времени основных аттракторов: леса с преобладанием ели, молодые и средневозрастные леса с преобладанием мелколиственных пород, верховые болота, луга и залежи. Предложенная схема анализа позволяет оценивать положение каждого состояния съемки в этой системе координат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал возможность последовательного снижения пространства признаков многолетних серий МДДЗ на основе метода главных компонент с выделением, в конечном итоге, ограниченного числа независимых компонент, отражающих около половины исходного варьирования каналов съемки для всех сроков измерений, как инвариантов или параметров порядка сложной динамической системы, определяющих пространственно-временную динамику ее отражения. Показано, что на основе общих представлений о физическом смысле отражательных характеристиках для разных диапазонов электромагнитного спектра, возможна семантическая интерпретация инвариантов с определением основных свойств выделяемых ими территорий. Более детальная информация о семантическом содержании инвариантов может быть получена с использованием морфометрических характеристик рельефа и полевых данных. Показано, что инварианты отражают основные особенности растительного покрова исследуемой территории при их относительно низкой обусловленностью морфометрическими характеристиками рельефа.

Таким образом, выделенные инварианты, в первую очередь, отражают относительно стационарные состояния растительного покрова, что позволяет рассматривать отклонения от них новых данных как проявление обратимых и необратимых динамических процессов. С другой стороны, на основе инвариантов возможна сегментация территории с выделением типичных в пространстве и времени состояний, что может иметь широкое практическое применение как в лесном, так, особенно, и в сельском хозяйстве на фоне высокой внутри и межгодовой изменчивости отражательных характеристик деятельной поверхности земли, свойственной для агроландшафтов. Также инварианты могут быть использованы в решении задач, связанных с оценкой состояния окружающей среды, экологическим мониторингом и экосистемными услугами. Так, устойчивые отношения переменных за определенный временной интервал могут рассматриваться как “отправная точка” или эталон.

Количественное выявление факторов, влияющих на структуру отражения территории, в частности растительности, на фоне инвариантных отношений, является основой для расчетов последствий при различной хозяйственной деятельности. Например, данные расчеты для инвариантов температурных полей (Пузаченко и др., 2019) имеют принципиально важное значение, так как показано, что вырубки крупных площадей повышают температуру окружающего воздуха сопоставимо с глобальным потеплением, что приводит к повышению уровня пожарной опасности для окружающих территорий.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по теме № FMGE-2019-0007 Государственного задания Института географии РАН (в части сбора данных) и гранта РФФИ № 22-27-00781 (в части анализа данных).

## FUNDING

The work was financially supported by state task FMGE-2019-0007 (data collection) and Russian Science Foundation, project no. 22-27-00781 (data analysis).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бевз В.Н.* Инвариантный аспект пространственно-временной организации склоновых ландшафтов // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. география и геоэкология. 2002. № 1. С. 48–52.
- Большаков А.Г.* Основы теории градостроительства и районной планировки. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. техн. ун-та, 2004. 216 с.
- Бородин О.И., Бугай А.С., Гихман И.И.* Биографический словарь деятелей в области математики. Киев: Рад. школа, 1979. 607 с.

- Васильев И.С. и др.* Устойчивость криогенных ландшафтов на северном участке трассы железной дороги Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2009. № 2. С. 4–8.
- Коберниченко В.Г., Тренихин В.А.* Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 4. С. 22–31.
- Крауклис А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 282 с.
- Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г., Пузаченко М.Ю.* Пространственная организация регионального мезоклимата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 3. С. 116–130.
- Макушина Г.С.* Геофизические системы ландшафтов // География и природные ресурсы. 2011. № 4. С. 5–11.
- Мильков Ф.Н.* Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1986. 326 с.
- Петрищев В.П. и др.* Особенности формирования ландшафтов Индерского солянокупольного района (Прикаспийская впадина) // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 79–84.
- Преображенский В.С., Александрова Т.Д.* Первичный анализ терминов динамики ландшафтов // Изв. ВГО. 1975. Т. 107. № 5. С. 397–404.
- Пузаченко Ю.Г.* Инвариантность геосистем и их компонентов / Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 32–41.
- Пузаченко Ю.Г.* Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 6–16.
- Пузаченко Ю.Г., Байбар А.С., Варлагин А.В., Кренке А.Н., Сандлерский Р.Б.* Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 2. С. 51–68.
- Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М.* Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.П.* Независимость внутри целого и в биотической части геосистемы / Системный подход в географии. Тез. докл. М., 1972. С. 22–23.
- Сандлерский Р.Б.* Выявление инварианта энергетического поля ландшафта на основе дистанционной спектральной информации. [http://www.landscape.edu.ru/files/sand\\_lomonos\\_2007.pdf](http://www.landscape.edu.ru/files/sand_lomonos_2007.pdf) (дата обращения 25.03.2019).
- Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г.* Энергетические характеристики геосистем Центрально-Лесного заповедника по данным дистанционного зондирования // Тр. Центрально-Лесного гос. природ. биосф. зап. 2007. № 5. С. 429–440.
- Скулкин В.С.* Эмпирическая мелкомасштабная модель растительности СССР: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Институт географии АН СССР, 1979. 24 с.
- Сочава В.Б.* Вопросы классификации растительности, типологии физико-географических фаций и биогеоценозов // Вопросы классификации растительности. Свердловск: Уральский филиал АН СССР, 1961. С. 5–22.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Хакен Г.* Принципы работы голоногого мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: Изд-во Пер СЕ, 2001. 351 с.
- Хакен Г.* Синергетика. М.: Изд-во МИР, 1980. 405 с.
- Черных Д.В.* О границах ландшафта: неортодоксальный взгляд физико-географа // Международ. журн. исследований культуры. 2015. № 4 (21). С. 63–72.
- Самонастраивающиеся системы: справочник / ред. П.И. Чинаев. Киев: Наукова думка, 1969. 528 с.
- Allen T.F.H., Starr T.B.* Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago: Chicago Univ. Press, 1982. 310 p.
- Campbell M.J., Congalton R.G.* Landsat-based land cover change analysis in Northeastern Oregon's timber resource dependent communities // American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2012 Annual Conference. 2012. P. 19–23.
- Cao W., Li B., Zhang Y.* A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform / Int. Conference on Neural Networks and Signal Processing. 2003. Vol. 2. P. 976–981.
- Chang H., Yoon W.S.* Improving the classification of Landsat data using standardized principal components analysis // KSCE J. Civil Engineering. 2003. № 7 (4). P. 469–474.
- Choi M.* A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. Vol. 44. P. 1672–1682.
- Forman R.T.* Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 217 p.
- Forman R.T., Godron M.* Landscape Ecology. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1986. 620 p.
- Gobattoni F., Lauro G., Monaco R., Pelorosso R.* Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests // Acta Applicandae Mathematicae. 2013. № 125 (1). P. 173–192.
- Griffiths P., van der Linden S., Kuemmerle T., Hostert P.* A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area land cover mapping // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sens. 2013. Vol. 6 (5). P. 2088–2101.
- Holben B.N.* Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data // Int. J. Remote Sens. 1986. Vol. 7 (11). P. 1417–1434.
- Ingebritsen S.E., Lyon R.J.P.* Principal components analysis of multitemporal image pairs // Int. J. Remote Sens. 1985. Vol. 6 (5). P. 687–696.
- Kwarteng P., Chavez A.* Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1989. Vol. 55 (1). P. 339–348.
- Luo Y., Trishchenko A.P., Khlopenkov K.V.* Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America // Remote Sens. of Environ. 2008. Vol. 112 (12). P. 4167–4185.

- Metwalli M.R., Nasr A.H., Allah O.S.F., El-Rabaie S., Abd El-Samie F.E. Satellite image fusion based on principal component analysis and high-pass filtering // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2010. Vol. 27. P. 1385–1394.
- Naidu V.P.S., Raol J.R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis // *Def. Sci. J.* 2008. Vol. 58. P. 338–352.
- Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V., Arbiol R. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. Vol. 37. P. 1204–1211.
- O'Neill R.V., Deangelis D.L., Waide J.B., Allen T.F., Allen G.E. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton: Princeton Univ. Press, 1986. № 23. 254 p.
- O'Neill R.V., Milne B.T., Turner M.G., Gardner R.H. Resource utilization scales and landscape pattern // *Landscape Ecol.* 1988. Vol. 2 (1). P. 63–69.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sens. of Environ.* 2011. Vol. 115 (2). P. 548–561.
- Riasati V.R., Zhou H. Reduced data projection slice image fusion using principal component analysis // *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5813. P. 1–15.
- Roy D.P., Ju J., Kline K., Scaramuzza P.L., Kovalskyy V., Hansen M., Loveland T.R., Vermote E., Zhang C. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States // *Remote Sens. of Environ.* 2010. Vol. 114 (1). P. 35–49.
- Sandlersky R., Krenke A. Solar energy transformation strategies by ecosystems of the boreal zone (thermodynamic analysis based on remote sensing data) // *Entropy*. 2020. Vol. 22. № 10. P. 1132–1140.
- Shahdoosti H.R., Ghassemian H. Spatial PCA as a new method for image fusion // *The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP 2012)*. 2012. P. 90–94.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. A new look at IHS-like image fusion methods // *Information Fusion*. 2001a. Vol. 2 (3). P. 177–186.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation // *Opt. Eng.* 2001b. Vol. 40. P. 720–728.
- Turner M.G. Landscape ecology: the effect of pattern on process // *Annual Rev. Ecol. Evol. Syst.* 1989. Vol. 20 (1). P. 171–197.
- Turner M.G. Landscape ecology: what is the state of the science? // *Annual Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2005. Vol. 36. P. 319–344.
- Turner M.G., Gardner R.H., O'Neill R.V. Landscape ecology in theory and practice. NY: Springer, 2001. 499 p.
- White J.C., Wulder M.A. The Landsat observation record of Canada: 1972–2012 // *Canadian J. of Remote Sens.* 2014. Vol. 39 (6). P. 455–467.
- Wu J.G. Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In: Key topics in landscape ecology / J.G. Wu, R. Hobbs (Eds). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. P. 115–142.
- Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations // *Landscape Ecology*. 2004. Vol. 19 (2). P. 125–138.
- Zhu Z., Woodcock C.E., Holden C., Yang Z. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time // *Remote Sens. of Environ.* 2015. Vol. 162. P. 67–83.

## Landscape Invariants—Order Parameters of a Dynamic System

A. S. Baibar<sup>1, 2, 3, \*</sup>, M. Yu. Puzachenko<sup>1</sup>, R. B. Sandlersky<sup>2, 3</sup>, and A. N. Krenke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*HSE University, Moscow, Russia*

\*e-mail: baybaranastasia@yandex.ru

The article considers theoretical and methodological substantiation of identifying invariants problem in non-linear dynamic systems. Invariance in context of stable spatio-temporal structures in a landscape was proposed by V.B. Sochava in 1961. The accumulation of long-term series of landscape observations by means of multispectral imaging made it possible to identify invariants in practice. An analysis of Landsat multispectral measurements from 1987 to 2022 for the southern taiga landscape (Central Forest State Nature Biosphere Reserve) shows that invariants identified as order parameters primarily determine total aboveground vegetation biomass, the water content in vegetation and soils, and the intensity of photosynthesis, i.e. bioproduction process. The proposed scheme for analyzing time series of remote sensing data makes it possible to assess landscape cover at the time of survey with respect to invariants and to identify the main control parameters that determine changes in environmental conditions and self-development of geosystems. The assessment of vegetation and relief contribution to formation of invariants structure was made to reveal invariants physical meaning. The results showed that relief has little effect on order parameters, and vegetation cover make the greatest contribution to invariant structure formation. Since invariants make it possible to identify the most stationary states, they can be used to solve applied problems in agriculture and forestry, as well as in the assessment of various ecosystem services.

**Keywords:** multispectral remote sensing data, order parameters, invariant, synergetics, Landsat, Central Forest State Nature Biosphere Reserve, Principal Component Method, geobotanical descriptions, morphometric characteristics of relief, southern taiga landscape, south of the Valdai Upland

## REFERENCES

- Allen T.F.H., Starr T.B. Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago: The University of Chicago Press, 1982. 310 p.
- Bezv V.N. The invariant aspect of the spatio-temporal organization of slope landscapes, *Vestn. Voronezh. Univ. Ser. Geogr. i Geoekol.*, 2002, no. 1, pp. 48–52. (In Russ.).
- Bolshakov A.G. *Osnovy teorii gradostroitel'stva i raionnoi planirovki* [Fundamentals of the Theory of Urban Planning and District Planning]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2004. 216 p.
- Borodin O.I., Bugai A.S., Gikhman I.I. *Biograficheskii slovar' deyatelei v oblasti matematiki* [Biographical Dictionary of Actors in Mathematics]. Kyiv: Rad. Shkola, 1979. 607 p.
- Campbell M.J., Congalton R.G. Landsat-based land cover change analysis in Northeastern Oregon's timber resource dependent communities. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2012 Annual Conference, 2012, pp. 19–23.
- Cao W., Li B., Zhang Y. A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform. In *International Conference on Neural Networks and Signal Processing*, 2003, vol. 2, pp. 976–981.
- Chang H., Yoon W.S. Improving the classification of Landsat data using standardized principal components analysis. *KSCE J. Civ. Eng.*, 2003, vol. 7, no. 4, pp. 469–474.
- Chernykh D.V. On the boundaries of the landscape: an unorthodox view of a physical geographer. *Mezhdunar. Zh. Issled. Kultury*, 2015, vol. 4, no. 21, pp. 63–72. (In Russ.).
- Samonastravayushchiesya sistemy: spravochnik* [Self-adjusting Systems: A Reference Book]. Chinaev P.I., Ed. Kyiv: Naukova Dumka, 1969. 528 p.
- Choi M. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, no. 44, pp. 1672–1682.
- Forman R.T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge Univ. Press, 1995. 217 p.
- Forman R.T., Godron M. Landscape Ecology. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986. 620 p.
- Griffiths P., van der Linden S., Kuemmerle T., Hostert P. A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area land cover mapping. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2013, vol. 6, no. 5, pp. 2088–2101.
- Gobattoni F., Lauro G., Monaco R., Pelorosso R. Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests. *Acta Appl. Math.*, 2013, vol. 125, no. 1, pp. 173–192.
- Haken G. *Printsipy raboty golonogogo mozga: Sinergeticheskii podkhod k aktivnosti mozga, povedeniyu i kognitivnoi deyatel'nosti* [Principles of the Bare-Legged Brain: A Synergistic Approach to Brain Activity, Behavior and Cognitive Activity]. Moscow: PER CE Publ., 2001. 351 p.
- Haken G. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow: PER CE Publ., 1980. 405 p.
- Holben B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 1986, vol. 7, no. 11, pp. 1417–1434.
- Ingebritsen S. E., Lyon R. J.P. Principal components analysis of multitemporal image pairs. *Int. J. Remote Sens.*, 1985, vol. 6, no. 5, pp. 687–696.
- Kobrnichenko V.G., Trenikhin V.A. Methods for the synthesis of images based on remote sensing data of the Earth of various resolutions. *Usp. Sovrem. Radioelektroniki*, 2007, no. 4, pp. 22–31. (In Russ.).
- Krauklis A.A. *Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya* [Problems of Experimental Landscape Science]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 282 p.
- Krenke A.N., Puzachenko Yu.G., Puzachenko M.Yu. Spatial Organization of Regional Mesoclimate. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 116–130. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587-556620193116-130>
- Kwarteng P., Chavez A. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1989, vol. 55, no. 1, pp. 339–348.
- Luo Y., Trishchenko A.P., Khlopenkov K.V. Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America. *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112 (12), pp. 4167–4185.
- Makunina G.S. Geophysical systems of landscapes. *Geogr. Nat. Resour.*, 2011, no. 32, pp. 301–307.
- Metwalli M.R., Nasr A.H., Allah O.S.F., El-Rabaie S., Abd El-Samie F.E. Satellite image fusion based on principal component analysis and high-pass filtering. *J. Opt. Soc. Am.*, 2010, no. 27, pp. 1385–1394.
- Milkov F.N. *Fizicheskaya geografiya: uchenie o landshafte i geograficheskaya zonal'nost'* [Physical Geography: Landscape Studies and Geographic Zoning]. Voronezh: Voronezh. Univ. Publ., 1986. 326 p.
- Naidu V.P.S., Raol J.R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis. *Def. Sci. J.*, 2008, no. 58, pp. 338–352.
- Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V., Arbiol R. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, no. 37, pp. 1204–1211.
- O'Neill R.V., Deangelis D.L., Waide J.B., Allen T.F., Allen G.E. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton University Press, 1986, no. 23. 254 p.
- O'Neill R.V., Milne B.T., Turner M.G., Gardner R.H. Resource utilization scales and landscape pattern. *Landscape Ecol.*, 1988, vol. 2, no. 1, pp. 63–69.
- Petrishchev V.P. et al. The formation features of landscapes in the Inderskii salt-dome area (Precaspian Hollow). *Geogr. Nat. Resour.*, 2011, no. 32, pp. 146–151.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia. *Remote Sens. Environ.*, 2011, vol. 115, no. 2, pp. 548–561.
- Preobrazhensky V.S., Aleksandrova T.D. Primary analysis of the terms of landscape dynamics. *Izv. VGO*, 1975, vol. 107, no. 5, pp. 397–404. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G. Invariance of geosystems and their components. In *Ustoichivost' geosistem* [Stability of Geosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1983, pp. 32–41. (In Russ.).

- Puzachenko Yu.G. Invariants of the dynamic geosystems. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 5, pp. 6–16. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Baibar A.S., Varlagin A.V., Krenke A.N., Sandler'sky R.B. Thermal field of the southern taiga landscape of the Russian Hidden. *Izv. Akad. Nauk. Geogr. Ser.*, 2019, no. 2, pp. 51–68. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Aleshchenko G.M. Spectral analysis of the hierarchical organization of the relief. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002, no. 4, pp. 29–38. (In Russ.).
- Puzachenko Yu. G., Skulkin V.P. Independence within the whole and in the biotic part of the geosystem. System approach in geography. *Tezisy Dokl.*, M., 1972, pp. 22–23. (In Russ.).
- Riasati V.R., Zhou H. Reduced data projection slice image fusion using principal component analysis. *Proc. SPIE*, 2005, no. 5813, pp. 1–15.
- Roy D.P., Ju J., Kline K., Scaramuzza P.L., Kovalsky V., Hansen M., Loveland T.R., Vermote E., Zhang C. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sens. Environ.*, 2010, vol. 114, no. 1, pp. 35–49.
- Sandler'sky R.B. Revealing the invariant of the energy field of the landscape based on remote spectrozonal information. Available at: [http://www.landscape.edu.ru/files/sand\\_lomonos\\_2007.pdf](http://www.landscape.edu.ru/files/sand_lomonos_2007.pdf) (accessed 03.25.2019)
- Sandler'sky R., Krenke A. Solar energy transformation strategies by ecosystems of the boreal zone (thermodynamic analysis based on remote sensing data). *Entropy*, 2020, vol. 22, no. 10, pp. 1132–1140.
- Sandler'sky R.B., Puzachenko Yu.G. Energy characteristics of the geosystems of the Central Forest Reserve according to remote sensing data. *Proceedings of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve*, 2007, no. 5, pp. 429–440. (In Russ.).
- Shahdoosti H.R., Ghassemian H. Spatial PCA as a new method for image fusion. In The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP 2012), 2012, pp. 90–94.
- Skulkin V.S. Empirical small-scale model of vegetation of the USSR. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geography) Dissertation*. Inst. Geogr. Akad. Nauk SSSR, 1979. 24 p.
- Sochava V.B. Questions of classification of vegetation, typology of physical-geographical facies and biogeocenoses. In *Voprosy klassifikatsii rastitel'nosti* [Issues of Vegetation Classification]. Sverdlovsk: Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, pp. 5–22. (In Russ.).
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [Introduction to the Theory of Geosystems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 319 p.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. A new look at IHS-like image fusion methods. *Information Fusion*, 2001a, vol. 2, no. 3, pp. 177–186.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation. *Opt. Eng.*, 2001b, no. 40, pp. 720–728.
- Turner M.G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1989, vol. 20(1), pp. 171–197.
- Turner M.G. Landscape ecology: what is the state of the science? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 2005, vol. 36, pp. 319–344.
- Turner M.G., Gardner R.H., O'Neill R.V. *Landscape ecology in theory and practice*. New York: Springer, 2001, vol. 401. 499 p.
- Vasiliev I.S. et al. Stability of cryogenic landscapes on the northern section of the Yakutia railway line. *Prir. Resur. Arktiki i Subarkтики*, 2009, no. 2, pp. 4–8. (In Russ.).
- White J.C., Wulder M.A. The Landsat observation record of Canada: 1972–2012. *Canadian J. Remote Sens.*, 2014, vol. 39, no. 6, pp. 455–467.
- Wu J.G. Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In *Key topics in landscape ecology*. Wu J.G., Hobbs R., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, 2006, pp. 115–142.
- Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landsc. Ecol.*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 125–138.
- Zhu Z., Woodcock C.E., Holden C., Yang Z. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time. *Remote Sens. Environ.*, 2015, no. 162, pp. 67–83.