

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-55-58

**ЛАНДШАФТНЫЕ ИНВАРИАНТЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА****LANDSCAPE INVARIANTS BASED ON REMOTE SENSING DATA AND DIGITAL RELIEF MODEL****Пузаченко М.Ю.<sup>1</sup>, Байбар А.С.<sup>1,2</sup>, Сандлерский Р.Б.<sup>2</sup>, Кренке А.Н.<sup>1,2</sup>****Puzachenko M.Yu.<sup>1</sup>, Baibar A.S.<sup>1,2</sup>, Sandlersky R.B.<sup>2</sup>, Krenke A.N.<sup>1,2</sup>**

e-mail: m.yu.puzachenko@igras.ru

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия<sup>1</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

**Аннотация.** Понятие инвариантов как устойчивых во времени пространственных структур в ландшафте предложено В.Б. Сочавой. Количественное выявление инвариантов стало возможным с накоплением многолетних рядов наблюдений состояний ландшафта посредством мультиспектральной съемки. Для территории ЦЛГПБЗ получено, что инварианты, выделяемые как параметры порядка, определяют общую надземную биомассу растительности, влагосодержание ландшафтного покрова и интенсивность биопродукционного процесса. Обобщение инвариантов отражения и рельефа позволяют выделить ландшафтные инварианты.

**Abstract.** V.B. Sochava proposed the concept of invariants as spatial structures stable in time in the landscape. Quantitative elicitation of invariants became possible with the accumulation of long-term series of observations of the landscape conditions through multi-spectral imaging. For the territory of the Central Forest Biosphere Reserve, it was obtained that the invariants identified as order parameters determine the total vegetation biomass, the moisture content of the landscape cover, and the intensity of the bioproduction process. Integration of reflection and relief invariants makes it possible to estimate landscape invariants.

**Ключевые слова:** инвариант, параметры порядка, Landsat, МДЗ, ЦЛГПБЗ, метод главных компонент, морфометрические характеристики рельефа

**Keywords:** invariant, order parameters, Landsat, MRSD, CFGNBR, principal component method, morphometric characteristics of the relief

**Введение.** Появление новых средств измерения свойств ландшафта, таких как МДЗ, позволило применить к анализу его функционирования методический подход, основой которого является представление о ландшафте, как о сложной динамической системе [1]. В качестве теоретико-методологического основания для исследования пространственно-временной динамики геосистем может рассматриваться синергетика. Введенное одним из ее основоположников Г. Хакеном [4] 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 [3] как некоторой пространственной структуры неизменной на определенном временном интервале. В настоящем сообщении предпринята попытка продемонстрировать их выделение и семантическую интерпретацию для хорошо изученной территории Центрально-Лесного заповедника.

**Материалы и методы исследований.** Исследование проводилось на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника и прилегающих территорий общей площадью 139 т. га. В качестве исходных данных были использованы все безоблачные сцены Landsat 4-9. В анализе используются все основные каналы (синий, зелёный, красный, ближний инфракрасный (БИК) и два коротковолновых ИК (КИК)) для 19 сцен, выполненных с 1987 по 2022 годы (5 за февраль, 3 за март, 4 за апрель, 1 за май, 4 за июнь и 2 за сентябрь). ЦМР территории построена на основе топографических карт крупного масштаба. В качестве информации для верификации выделяемых инвариантов использованы 3079 полевых описаний характеристик растительности, почв и почвообразующих пород, выполненных с 1993 по 2019 годы.

Выделение инвариантов производилось в несколько этапов методом главных компонент. На первом этапе выполнено обобщение каналов для каждого срока съемки и выделены главные компоненты снимков. На следующем этапе они обобщаются по всем срокам, согласно их связи с исходными каналами. В анализе остаются те обобщенные компоненты (частные инварианты), которые имеют высокие факторные нагрузки (ФН) с большинством сроков съемки, либо имеют сезонную составляющую и долю общей дисперсии больше 1. Далее выделяются общие инварианты отражения на основе обобщения частных инвариантов. Морфометрические характеристики рельефа (уклон, освещенность с запада и юга, профильная, плановая, продольная и кросс-секционная выпуклость, минимальная и максимальная кривизна, оператор Лапласа) для разных иерархических уровней (с линейными размерами 90, 150, 290, 450, 1050, 1290, 1650, 2430, 3810 метров) [2] обобщаются методом главных компонент с выделением общих инвариантов рельефа. Инварианты отражения и рельефа обобщаются для получения ландшафтных инвариантов, связь которых с характеристиками полевых описаний определяется пошаговым мультирегрессионным анализом (метод - включение, уровень включения переменных  $p=0.05$ ) на основе исправленного  $R^2$ . Интерпретация содержания ландшафтных инвариантов проводится на основе физического содержания компонентов отражения и характеристик рельефа.

**Результаты.** Для всех сроков съемки выделяются ведущие главные компоненты, обобщающие яркость всех каналов, КИК каналы, БИК канал (присутствует только в бесснежный период). Компоненты снимков описывают варьирование каналов съемки минимум на 94%, таким образом, практически полностью сохраняя всю исходную информацию по каждому сроку съемки. В ходе обобщения компоненты яркости всех каналов выделен один частный инвариант, имеющий наибольшие ФН со всеми сроками съемки, который описывает почти 70% исходного варьирования компоненты яркости каналов. Обобщение компоненты БИК канала выделяет частный сезонный инвариант, имеющий высокие противоположные по знаку ФН с компонентой БИК канала в летний и весенне-осенний периоды, и частный инвариант, имеющий высокие ФН со всеми сроками съемки, совместно описывающие более 60% исходного варьирования. Для КИК компоненты снимков выделяются частный инвариант, имеющий наибольшие ФН со всеми сроками съемки, кроме первой-второй декады апреля, частный сезонный инвариант, имеющий высокие противоположные по знаку ФН с компонентой КИК каналов в летне-осенний и зимне-весенний сроки съемки, и частный апрельский инвариант имеющий наибольшие ФН с компонентой КИК каналов первой-второй декады апреля, описывающие около 55 % исходного варьирования компоненты КИК каналов за все сроки съемки.

При обобщении частных инвариантов выделяется три общих инварианта отражения. Первый имеет наибольшие положительные ФН с частными инвариантами компонент общей яркости и БИК канала и наибольшую отрицательную ФН с частным сезонным инвариантом компоненты КИК каналов. Вторым общим инвариантом определяется наиболее высокими ФН с различными знаками частным сезонным инвариантом компоненты БИК канала и инвариантом компоненты КИК каналов. Третий общий инвариант имеет наибольшую ФН на частный инвариант компонент КИК каналов первой-второй декады апреля и, с обратным знаком, высокую ФН с частным инвариантом компоненты БИК канала. Совместно общие инварианты отражения описывают около 70 % варьирования частных инвариантов.

В ходе обобщения характеристик рельефа, рассчитанных для 9 размеров скользящего квадрата, отражающего линейные размеры уровней его иерархической организации, выделено 12 главных компонент, имеющих долю общей дисперсии более 1, которые описывают около 70% варьирования исходных характеристик рельефа (табл. 1).

Таблица 1. Морфометрические характеристики рельефа, определяющие его инварианты

|    | отрицательно                                                      | положительно                               |
|----|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1  | Лапласиан (90-1050 м)                                             |                                            |
| 2  | Минимальная, продольная и профильная кривизны (1650 м)            | Лапласиан (150 м)                          |
| 3  |                                                                   | Уклоны                                     |
| 4  | Освещенность с юга                                                | Освещенность с востока                     |
| 5  | Лапласиан, максимальная, продольная и профильная кривизны (450 м) | Лапласиан и минимальная кривизна (3810 м)  |
| 6  | Освещенность с востока и юга                                      |                                            |
| 7  | Плановая кривизна (1705-2430 м)                                   | Кривизна поперечного сечения (1705-2430 м) |
| 8  |                                                                   | Лапласиан и максимальная кривизна (3810 м) |
| 9  | Освещенность с востока (150-450 м)                                |                                            |
| 10 | Освещенность с Ю (150-450 м)                                      |                                            |
| 11 | Освещенность с юга (150-270 м)                                    | Освещенность с востока (1705-2430 м)       |
| 12 | Кривизна поперечного сечения, продольная и профильная (3810 м)    | Плановая кривизна (3810 м)                 |

Обобщение инвариантов отражения и рельефа выделяет 3 основных общих ландшафтных инварианта и три дополнительных, доописывающих нелинейные отношения, описывая около 40 % варьирования инвариантов отражения и рельефа (табл. 2). Из 12 общих инвариантов рельефа 6 значительно связаны с общими инвариантами отражения.

Мультирегрессионный анализ ландшафтных инвариантов с характеристиками комплексных ландшафтных описаний показал высокий уровень их связи (табл. 3). В целом, наибольшую связь с ландшафтными инвариантами демонстрирует наземный покров, а характеристики почв и почвообразующих пород определяют их в меньшей степени.

**Обсуждение результатов.** В результате проведенного анализа показана возможность на основе временных серий МДДЗ и ЦМР выделения ограниченного числа ортогональных переменных, описывающих основные закономерности отражения поверхности и строения рельефа территории и имеющих значимые связи с характеристиками полевых описаний. Исходя из физического смысла компонент каналов дистанционной съемки, где общая яркость всех каналов отражает надземную биомассу, яркость БИК – интенсивность биопродукционного процесса, а яркость в КИК – содержание свободной воды в

экосистемах, характеристик рельефа и полевых комплексных описаний может быть получено представление о семантическом содержании выделяемых инвариантов (рис.).

Таблица 2. ФН инвариантов отражения и рельефа с ландшафтными инвариантами

| Инвариант            | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 1 отражения          | 0.22  | 0.53  | -0.53 | 0.44   | 0.42  | 0.12  |
| 2 отражения          | 0.83  | -0.23 | 0.05  | -0.041 | -0.18 | 0.47  |
| 3 отражения          | 0.14  | 0.53  | 0.55  | -0.46  | 0.42  | 0.08  |
| 2 рельефа            | -0.01 | 0.25  | 0.28  | 0.23   | -0.20 | 0.00  |
| 3 рельефа            | 0.82  | -0.16 | 0.04  | 0.03   | 0.13  | -0.46 |
| 4 рельефа            | -0.19 | -0.06 | 0.25  | 0.21   | 0.04  | 0.11  |
| 6 рельефа            | -0.01 | -0.17 | 0.56  | 0.47   | 0.13  | 0.00  |
| 11 рельефа           | -0.11 | -0.39 | -0.05 | -0.04  | 0.31  | 0.06  |
| 12 рельефа           | -0.16 | -0.41 | -0.03 | -0.03  | 0.32  | 0.09  |
| Собственные значения | 1.52  | 1.22  | 1.18  | 0.82   | 0.78  | 0.49  |
| Доля общей дисперсии | 0.10  | 0.08  | 0.08  | 0.06   | 0.05  | 0.03  |

Так первый ландшафтный инвариант высокими значениями выделяет территории с выраженными уклонами, высокой интенсивностью биопродукционного процесса летом и низким влагосодержанием в течении всего года, т.о. в первую очередь выделяя склоны грядовых возвышенностей, холмов и долин речной сети. Соответственно, низкими значениями выделяются территории без выраженных уклонов с высокой интенсивностью биопродукционного процесса весной и в меньшей степени осенью с высоким влагосодержанием в течении всего года, выделяя массивы верховых болот и, в меньшей степени, отдельные участки лесов на локальных водоразделах озерно-ледниковой равнины. Первый ландшафтный инвариант дополняется шестым, выделяющим, в противоположность первому, склоны речных долин, приуроченных к грядам, низкими значениями.

Таблица 3. Результаты мультирегрессионного анализа

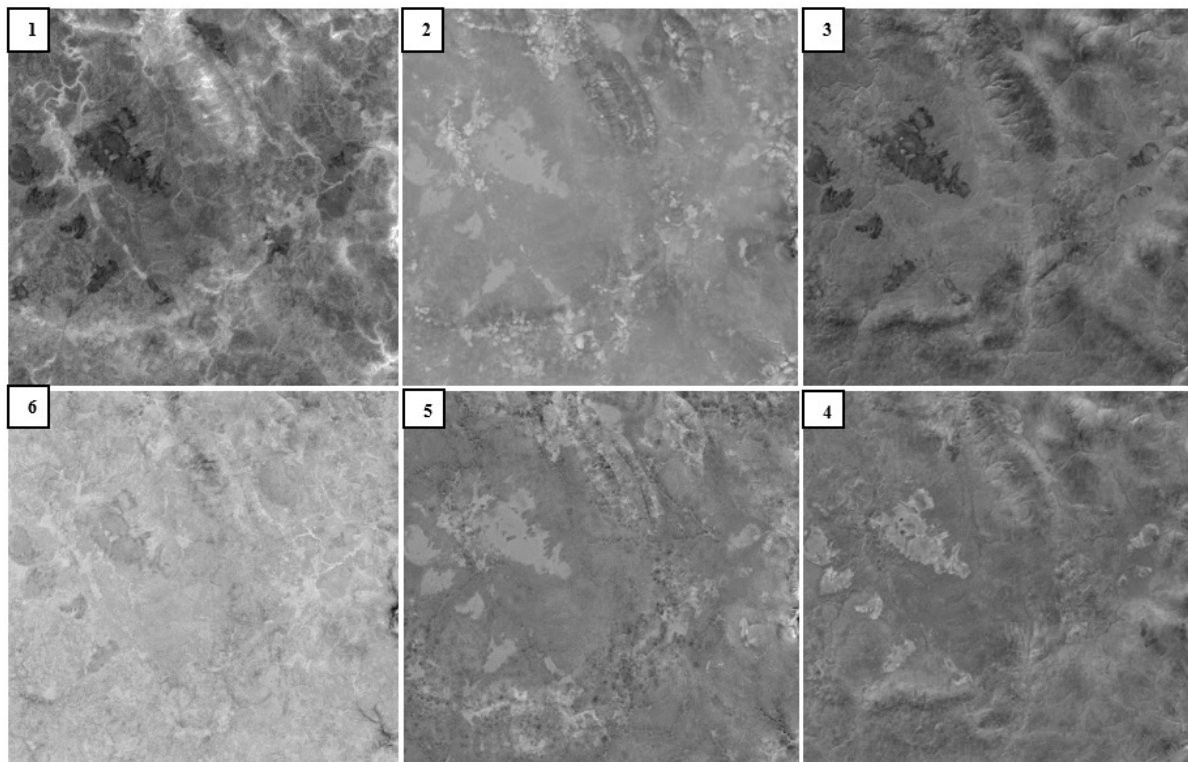
| Ландшафтный инвариант | Мультирегрессионный анализ (исправленный $R^2$ ) от характеристик                          |                                            |                                                            |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                       | растительности (древостой 2891 описаний, травостой 2034 описаний, совместно 1873 описания) | почв и почвообразующих пород 1870 описаний | растительности, почв и почвообразующих пород 1433 описаний |
| 1                     | 0.26, 0.65, 0.68                                                                           | 0.31                                       | 0.70                                                       |
| 2                     | 0.32, 0.41, 0.48                                                                           | 0.18                                       | 0.53                                                       |
| 3                     | 0.18, 0.30, 0.36                                                                           | 0.20                                       | 0.46                                                       |
| 4                     | 0.21, 0.27, 0.36                                                                           | 0.12                                       | 0.39                                                       |
| 5                     | 0.15, 0.31, 0.32                                                                           | 0.23                                       | 0.39                                                       |
| 6                     | 0.16, 0.21, 0.30                                                                           | 0.08                                       | 0.35                                                       |

Второй ландшафтный инвариант высокими значениями выделяет территории с низкой биомассой, высоким влагосодержанием летом и низким в апреле, с высокой интенсивностью биопродукционного процесса на выпуклых формах рельефа Ю и З экспозиций, т.о. выделяя суходольные луга и верховые болотные массивы. Низкими значениями выделяются территории с высокой биомассой, низким влагосодержанием летом и высоким в апреле, и низкой интенсивностью биопродукционного процесса на вогнутых формах рельефа С и В экспозиций, представленные склонами гряд и долинами речной сети. Дополняющий второй ландшафтный инвариант пятый, высокими значениями выделяет долины речной сети, приуроченные к грядам, и вогнутые части гряд.

Третий ландшафтный инвариант высокими значениями выделяет территории с высокой биомассой, низким влагосодержанием и интенсивностью биопродукционного процесса на вогнутых формах микро-мезорельефа СВ и З экспозиций, соответствующие склонам гряд и речных долин. Низкими значениями выделяются территории с низкой биомассой, высоким влагосодержанием и интенсивностью биопродукционного процесса на выпуклых формах микро-мезорельефа Ю экспозиций, представленные верховыми болотными массивами и вершинами гряд. Дополняющий третий ландшафтный инвариант четвертый высокими значениями выделяет верховые болотные массивы и склоны гряд, при этом речные долины на озерно-ледниковой равнине выделяются низкими значениями.

**Заключение.** Проведенный анализ показал возможность последовательного снижения пространства признаков многолетних серий МДДЗ на основе факторного анализа с выделением ограниченного числа инвариантов отражения и их интеграции с компонентами характеристик рельефа с выделением

обобщающих их ландшафтных инвариантов. Показано, что на основе общих представлений о физическом смысле отражательных характеристиках для разных диапазонов электромагнитного спектра и характеристик рельефа возможна семантическая интерпретация инвариантов с определением основных свойств выделяемых ими территорий. Более детальная информация о содержании инвариантов может быть получена с использованием полевых данных, имеющих с ними высокие статистически достоверные связи, и с помощью сегментации территории с выделением типичных в пространстве и во времени состояний, что может иметь широкое практическое применение как в лесном, так, особенно, сельском хозяйстве на фоне высокой внутри и межгодовой изменчивости отражательных характеристик деятельной поверхности земли, свойственной для агроландшафтов, а также для оценки динамических изменений при использовании актуальных данных об отражении территории.



*Рис. Ландшафтные инварианты*

*Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН  
AAAA-A19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007)*

#### **Литература**

1. Пузаченко Ю. Г. Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. №. 5. С. 6-16.
2. Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М. Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29-38.
3. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука. 1978. 319 с.
4. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности // М: Изд. Пер СЕ. 2001. 351 с.