

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 911.5/.9

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЮЖНО-ТАЕЖНОГО ЛАНДШАФТА  
РУССКОЙ РАВНИНЫ<sup>1</sup>

© 2019 г. Ю. Г. Пузаченко<sup>1</sup>, А. С. Байбар<sup>2, \*</sup>, А. В. Варлагин<sup>1</sup>, А. Н. Кренке<sup>3</sup>,  
Р. Б. Сандлерский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: baybaranastasia@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.07.2018 г.; после доработки 12.09.2018 г.; принята в печать 21.09.2018 г.

Рассмотрена технология выделения параметров порядка (инварианты) пространственной структуры теплового поля южно-таежного ландшафта (Центрально-Лесной заповедник), полученных на основе анализа временной серии измерений в длинноволновом канале спутников серии Landsat с 1986 по 2017 гг. и отражающих его стационарное состояние. Показано, что со спутника измеряется тепловой поток не непосредственно от крон леса, а от приземного слоя атмосферы, состояние которого определяется параметрами ландшафта. Установлено, что инвариантная составляющая пространственно-временного варьирования теплового поля отображается двумя параметрами порядка: первый преимущественно отражает температуру зимних месяцев, второй – летних. Выявлен вклад рельефа и растительности в определении инварианта и автохтонные составляющие теплового поля, определяемые переходными зонами между контрастными по тепловому излучению элементами ландшафта. Показано, что тепловое поле, измеряемое со спутника, отражает тепловой поток от приземного слоя атмосферы, находящийся в прямом взаимодействии с ландшафтным покровом.

**Ключевые слова:** тепловое (температурное) поле, лес, ландшафт, параметры порядка, инвариант, синергетика, Landsat.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019251-68>

Измерения излучения от атмосферы и поверхности земли со спутников де-факто открыли новую страницу в науках о Земле. Исследователи получили пространственно-временную распределенную информацию о фундаментальных планетарных физических процессах в широком диапазоне масштабов. Естественно, что научное сообщество оказалось неподготовленным к ее всестороннему анализу с позиций фундаментальной науки. В большинстве случаев эта ин-

формация используется в сугубо прагматических целях. Так, например, в использовании мультиспектральных измерений господствует, по сути, традиционный подход дешифрирования аэрофотоснимков и разработки индексов, призванных с некоторым приближением отразить состояние одной физической переменной: содержание хлорофилла, мезофилла, воды, целлюлозы, сахаров и полуэмпирических индексов вегетации, ориентированных на отражение в первую очередь

<sup>1</sup> В период подготовки данной статьи на 79 году жизни после непродолжительной болезни ушел из жизни один из ее авторов – наш друг и коллега, многолетний член нашей редколлегии – **Юрий Георгиевич Пузаченко**, выдающийся ландшафтовед и эколог, доктор географических наук, профессор, автор многих известных среди физико-географов и теоретиков географии книг и статей. В 31 год он стал доктором наук – самым молодым за всю историю современной отечественной географии, в 1972–1981 гг. заведовал лабораторией биогеоценологии Тихоокеанского института географии ДВНЦ АН СССР, организовывал научные рейсы в Тихий океан для изучения островных тропических экосистем, в 1990-х и 2000-х годах преподавал в Российском открытом университете и на географическом факультете МГУ, работал заведующим лаборатории, а потом – главным научным сотрудником Института проблем экологии и эволюции РАН, выпустил несколько учебников по общей экологии, ландшафтоведению и математическим методам в экологии и географии. У коллег создавалось чувство, что он постоянно чуть-чуть впереди, опережает, понимает и видит в науке больше, чем они... Вечная ему память!

биологической продуктивности [21]. С другой стороны, показано, что мультиспектральные измерения отраженной солнечной радиации позволяют оценить фундаментальные термодинамические переменные в каждой “точке” (пикселе) земной поверхности на момент измерения [17, 19], одной из этих переменных является тепловой поток, вносящий вклад в связанную (бросовую) энергию, не использованную в геосистеме. Значения термодинамических переменных, измеренные в каждый конкретный момент времени, в большей или меньшей степени отличаются друг от друга и коэффициенты парных корреляций разновременных сцен всегда меньше единицы. Таким образом, временные серии термодинамических переменных, как, впрочем, и любых индексов, можно рассматривать как отображение конкретного состояния ландшафтного покрова как динамической системы. Множество состояний отражает особенности течения измеряемых процессов как в пространстве, так и во времени, зависящих от внешних и внутренних факторов и, соответственно, содержат важнейшую информацию о динамике изучаемого явления и определяющих его механизмах. С другой стороны, на некотором достаточно большом интервале времени существует их инвариантная составляющая, отражающая устойчивую пространственную структуру каждой переменной. Анализ внешних и внутренних механизмов формирования пространственной структуры инварианта теоретически должен приводить к их пониманию.

В настоящей статье на примере измерения длинноволнового теплового излучения от поверхности Земли со спутников серии Landsat рассматривается подход к выделению пространственных инвариантов этого процесса и выделению факторов, определяющих их пространственную структуру.

## ВВЕДЕНИЕ

Со спутника Landsat измеряется длинноволновое излучение в полосе частот 10.3–12.5 мкм с разрешением 60–120 м на местности, которое может быть пересчитано в энергетические или температурные единицы измерения. С физической точки зрения это термодинамическая переменная, отражающая важнейший аспект преобразования солнечной радиации геосистемой. В соответствии с [17] поглощенная солнечная радиация ( $R$ ) в геосистеме преобразуется в три составляющих  $R = E_x + U + ST$ , где  $E_x$  – эксергия,  $U$  – внутренняя энергия,  $S$  – энтропия,  $T$  – тепловой поток. Эксергия (полезная работа) включает затраты энергии на испарение и фотосинтез, внутренняя энергия, есть энергия накапливаемая системой и используемая на собственные преоб-

разования,  $ST$  – связанная или бросовая энергия, то есть энергия не использованная системой и излученная в окружающую среду.

На основе мультиспектральных измерений можно приближенно оценить все термодинамические переменные [19, 20]. Однако получаемые оценки условны, так как осуществляются только для избранной части солнечного спектра. Только измерения в длинноволновом канале дают адекватную оценку теплового потока как термодинамической переменной. При прочих равных условиях, очевидно, что чем больше тепловой поток, тем меньше полезная работа системы и, по крайней мере, меньше затраты тепла на испарение. С другой стороны, температура сама по себе определяет биологическую продуктивность, территориальное распределение многих видов растений и животных, процессы почвообразования, технологию ведения сельского хозяйства и, наконец, комфортность среды для человека. Все это определяет естественный интерес к пространственно-временному варьированию этой переменной. Под *температурным (тепловым) полем* будем понимать совокупность значений температур (теплового потока) во всех точках рассматриваемого пространства в данный момент времени. Математически оно может быть описано уравнением зависимости температур от трех пространственных координат и от времени (нестационарное трехмерное температурное поле) [1].

Отображения тепловых полей на основе данных дистанционного зондирования получили широкое распространение в исследованиях температуры суши и океана на разных масштабных уровнях. По данным MODIS/Terra созданы серии температурных карт с глобальным уровнем генерализации (satellite Earth Surface Temperature products), обладающие временным разрешением менее чем сутки и пространственным – до  $0.1^\circ$  [2]. Снимки Landsat используются на региональном и локальном уровне. В первую очередь их применение предназначено для исследования городских островов тепла [12, 13], выявления территории с высокими рисками наступления пожаров [14, 22], мониторинга процессов заболачивания [3], засухи [16] и т.д. При этом малое внимание уделяется ландшафтным факторам формирования тепловых полей и только в единичных работах рассматривается влияние растительности и рельефа. По результатам исследований в еловых лесах, произрастающих в горах Чехии, установлено, что рельеф определяет значения температуры почти на 50% [15]. Зависимость между температурой (the surface temperature of the spruce forest) и растительностью изучалась в лесах Кореи. Модели, полученные по сценам Landsat, сопоставлялись с данными лесной таксации. Выявлены следующие основные

зависимости: чем моложе лес и меньше диаметр деревьев и чем меньше сомкнутость крон, тем выше температура приземного слоя [18].

Измеренное тепловое поле со спутника отражает потоки тепла в конкретный сезон и время суток. Оно зависит не только от функционирования подстилающей поверхности, но и от воздушной массы, господствующей на территории. Хотя измерения проводятся при ясном небе и, соответственно, при антициклональных условиях, реальные тепловые потоки могут определяться предшествующей воздушной массой и в силу инерционности конкретных геосистем для перехода их в равновесное новое состояние требуется разное время. Измерить равновесное температурное поле в силу разной инерционности и неравновесности большинства геосистем в период активной вегетации растительности практически невозможно. В идеале необходимо получить параметры инерционности разных подстилающих поверхностей относительно различных внешних возмущений в разные сезоны года и время суток, и зависимость теплового потока от функционирования конкретных геосистем. При этом можно поставить задачу выделения части пространственного варьирования, которая не подвержена флюктуациям, связанным с неравновесными состояниями, и выделить независимую от них пространственную структуру теплового поля – инвариант в понимании В.Б. Сочавы [8, 4].

### ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является территория Центрально-Лесного биосферного заповедника и его окружения с координатами в углах прямоугольника 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 139.2 тыс. га. Заповедник расположен на юге Валдайской возвышенности с высотами от 200 м над ур. м. до 240 м над ур. м. Здесь представлено три основных типа местности: моренные гряды, сформированные московским оледенением, плоские озерные равнины на месте приледниковых озер и флювиогляциальные равнины в южной части территории [7]. Отложения морены и озер перекрыты лессовидным покровным суглинком. Для моренных гряд характерны южно-таежные широколиственно-еловые леса и их производные, для озерных и флювиогляциальных равнин – бореальные еловые леса в основном с палево-подзолистыми почвами. На пологих склонах гряд и в отдельных понижениях озерных равнин развиты верховые болота. На озерных отложениях в составе древесного полога еди-

нично или небольшими группами встречаются сосны. По болотам и их окраинам типично распространение сообществ болотной сосны [11]. В охранной зоне во второй половине XX в. произведены промышленные рубки, уничтожившие почти все еловые леса. В конце XX и первом десятилетии XXI вв. добираются “недорубы”. Небольшие по площади сплошные вырубki были так же проведены в южной части заповедника в период его закрытия (1951–1960 гг.). Естественными факторами динамики растительности являются ветровалы, охватывающие большие площади [11].

### МАТЕРИАЛЫ

В табл. 1 приведены сцены Landsat, использованные в анализе. За период измерений с 1986 по 2017 гг. было всего двадцать шесть сцен. Над рассматриваемой территорией Landsat 4 пролетает с 10:54 по 11:15, Landsat 5 с 10:28 по 11:42, Landsat 7 с 11:36 по 11:45, Landsat 8 с 11:47 по 12:00 по местному времени.

Для оценки зависимости поля температур от рельефа используется трехмерная модель, построенная на основе оцифровки топографической карты М 1:10000. Связь параметров растительности и теплового поля оценивается на основе 1460 геоботанических описаний в период с 1995 по 2017 гг. Все материалы приведены к разрешению 30 м на местности.

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Пересчет теплового длинноволнового канала Landsat в энергетические единицы дает тепловой поток от деятельной поверхности, который был пересчитан в температуру деятельной поверхности. Для этого использовалась формула:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{e_6 + 1}\right)}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура в кельвинах,  $K_1$  – калибровочная постоянная, Вт/м<sup>2</sup>мкм,  $K_2$  – калибровочная постоянная в кельвинах,  $e_6$  – TW, количество приходящего к сенсору излучения в тепловом канале, Вт/м<sup>2</sup>.

В рамках предлагаемой статьи решается несколько связанных задач, требующих применения различных методов. Первая основная задача выделения параметров порядка осуществляется методом главных компонент [9], позволяющим выделить ортогональные, взаимонезависимые виртуальные факторы или главные компоненты. Число компонентов определяется методом падающей осыпи по спектру нагрузок

**Таблица 1.** Данные дистанционного зондирования, использованные для анализа

Дата	Съемочная система	Температура			Ср. кв. отклонение
		Ср.	Мин.	Макс.	
04.02.1987	Landsat 5 TM	-11.14	-15.89	-8.03	1.082
06.02.2017	Landsat 8 OLI_TIRS	-15.09	-19.44	-13.23	0.929
11.02.2007	Landsat 5 TM	-14.92	-22.47	-11.57	1.681
21.03.1986	Landsat 5 TM	0.92	-3.50	5.49	1.354
22.03.2001	Landsat 7 ETM +	1.37	-0.36	3.09	0.406
20.03.2016	Landsat 8 OLI_TIRS	-5.22	-8.18	-3.64	0.670
28.03.2003	Landsat 7 ETM +	3.09	-1.41	6.42	1.513
10.04.2002	Landsat 7 ETM +	8.24	4.10	16.73	1.606
21.04.2009	Landsat 7 ETM +	2.25	-13.40	13.77	2.210
27.04.2000	Landsat 7 ETM +	14.23	11.85	20.83	1.164
03.05.1990	Landsat 5 TM	15.21	11.40	26.66	2.158
01.06.1992	Landsat 4 TM	14.58	-1.46	29.36	2.256
03.06.2007	Landsat 5 TM	13.74	-62.96	38.38	2.220
06.06.2014	Landsat 8 OLI_TIRS	21.26	-1.19	33.38	2.057
06.06.1988	Landsat 4 TM	19.67	15.01	27.36	1.080
20.06.2002	Landsat 7 ETM +	17.10	14.32	24.80	0.948
21.06.2002	Landsat 5 TM	19.08	10.92	29.17	1.668
14.08.2010	Landsat 5 TM	21.72	15.63	30.00	1.923
22.08.2007	Landsat 5 TM	20.43	15.63	28.34	0.984
20.09.2006	Landsat 5 TM	14.15	7.49	17.92	0.838
25.09.2008	Landsat 5 TM	8.94	3.44	13.30	1.013
26.09.2014	Landsat 8 OLI_TIRS	8.40	5.00	13.18	1.056
27.09.2000	Landsat 5 TM	7.27	3.76	14.32	1.149
30.09.2007	Landsat 5 TM	15.23	9.46	19.27	0.971
15.10.1986	Landsat 7 TM	5.27	-1.31	9.46	0.799

на факторы [5]. Температура в каждом пикселе определяется как

$$T_{xy}^t = m^t + \sum_{i=1}^k a_i^t F_{xy}^i, \quad (2)$$

где  $F_{xy}^i$  —  $i$ -пространственный инвариант для пикселя с координатами,  $xy$ ,  $m^t$  — среднее для всей территории в момент времени,  $t$ ,  $a_i^t$  — коэффициенты для фактора  $i$  в момент времени,  $t$  — времен-

ные инварианты, не зависящие от пространства. При предлагаемом подходе параметры порядка, рассчитываемые методом главных компонент, оцениваемые для всей территории, отражают стационарное неизменное во времени состояние системы и, следовательно, тождественны инвариантам для рассматриваемого временного интервала. Составляющая поля температур, не описываемая инвариантами, фиксируется в остатках, отражающих чаще всего существенно неравновесное

или нелинейное варьирование поля температуры и его отклонение от стационарности в конкретный момент времени. Качество описания каждого измерения от инвариантов определяется коэффициентом детерминации, отражающей долю описанного варьирования. Инварианты, рассчитываемые на основе метода главных компонент, безразмерны. Для отображения их физического смысла их можно через уравнение регрессии пересчитать в температуры для самого холодного (06.02.2017) и самого теплого (14.08.2010) сроков наблюдения.

Для того чтобы исследовать зависимость инвариантов от рельефа необходимо выделить иерархические уровни его организации и представить их через переменные рельефа, косвенно отображающие преобразование прихода солнечной энергии и транспорта влаги. Первая задача решается с помощью двумерного спектрального анализа с выделением частей спектра с различной фрактальной размерностью (семифракталов) и волн квазигармонических колебаний [6]. Для каждого иерархического уровня рельефа с помощью программы ENVI 4.5 рассчитываются следующие переменные: профильная выпуклость (*profile convexity*), плановая выпуклость (*plan convexity*), продольная кривизна (*longitudinal curvature*), минимальная и максимальная кривизна (*minimum and maximum curvatures*), кривизна поперечного сечения (*cross-sectional curvature*), крутизна склонов (*slope*), освещенность с юга и востока, лапласиан (*Laplacian*) [23], от которых строятся соответствующие уравнения методом пошаговой регрессии. Зависимость инвариантов от растительности оценивается также методом пошаговой регрессии и дискриминантным анализом, для которого инвариант преобразуется в дискретные состояния.

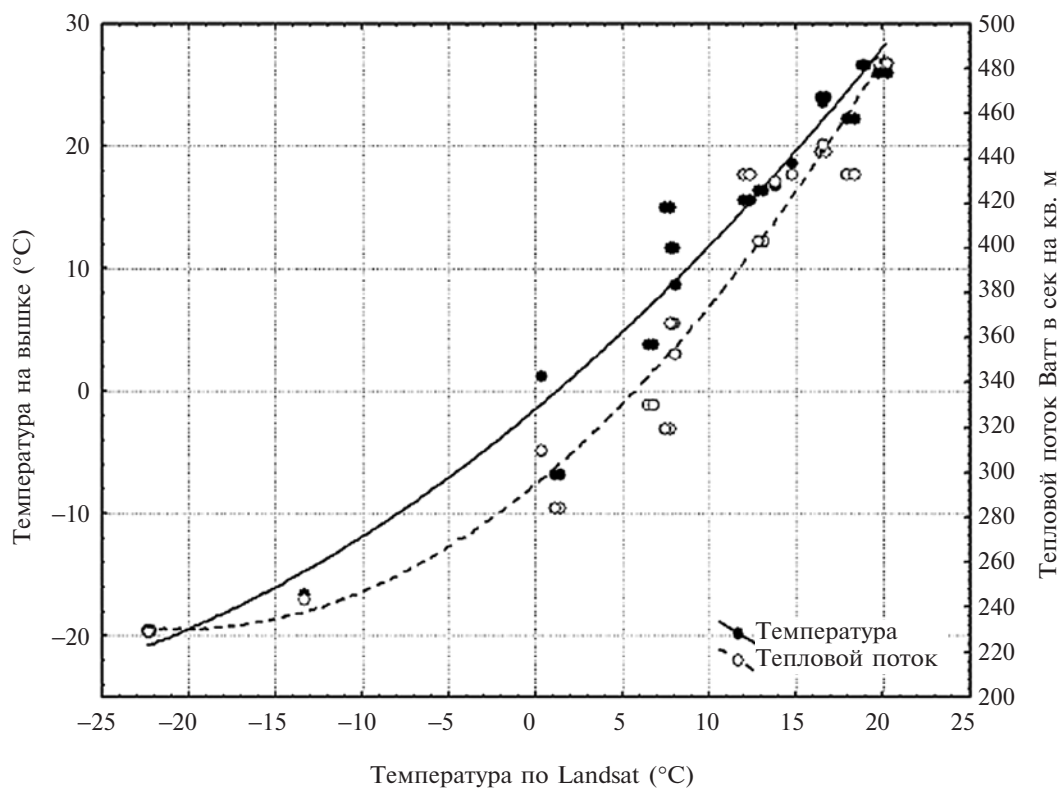
## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Прежде чем приступить к анализу, проверим соотношение между значениями измеренных температур с Landsat (TL) с измерениями в метеобудке на метеостанции (TM) и над пологом елового леса на вышке (ТВ). Для метеобудки получено уравнение регрессии  $TM = -0.5168 + 1.02 \cdot TL$  с  $R^2 = 0.95$ . Таким образом, полученное соотношение практически линейно и измеренная температура в метеобудке в среднем на  $0.5^\circ\text{C}$  ниже, чем при расчете по Landsat. Несколько более сложные соотношения между температурой над еловым лесом, измеренной на высоте 27 м и измерениями со спутника. Линейное уравнение регрессии для вышки:  $ТВ = 1.2784 + 1.195 \cdot TL$  с  $R^2 = 0.93$ , а статистически значимое уравнение второй степени  $ТВ = -1.45251 + 1.18876 \cdot TL + 0.0145 \cdot TL$

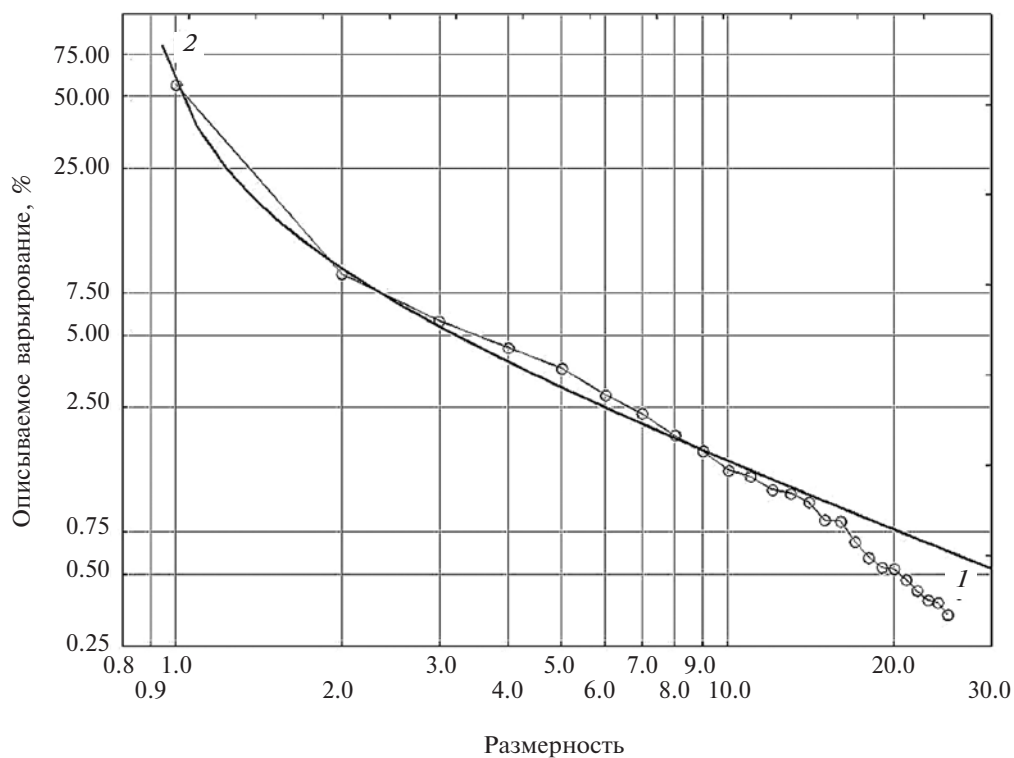
с  $R^2 = 0.97$ . Таким образом, температура, измеренная на вышке, в среднем на  $1.2^\circ\text{C}$  выше температуры, измеренной по Landsat (рис. 1). С учетом нелинейной зависимости получаем, что чем выше температура, измеренная по Landsat, тем непропорционально больше температура, измеренная на вышке. При максимальной температуре около  $20^\circ\text{C}$  температура на вышке примерно на  $8^\circ\text{C}$  выше, чем по Landsat, а при отрицательных температурах примерно на один градус ниже. Вполне понятно, что измеренная температура на метеостанции и на вышке зависят от конструктивных особенностей измерительных систем. Однако это не может объяснить установленные нелинейные отношения между переменными над лесом. Скорее всего, они связаны с существенно более высоким содержанием влаги в приземном слое атмосферы над лесом, поглощающим часть излученной длинноволновой радиации.

Этот механизм в частности подтверждается тем фактом, что зимой температуры, измеренные на вышке и по Landsat, различаются в среднем не более чем на один градус и температура, измеренная на вышке, может быть ниже температуры, измеренной с Landsat. Таким образом, с Landsat измеряется фактически тепловой поток от приземного слоя атмосферы, состояние которого определяется функционированием конкретных геосистем, образующий ландшафт. Этот слой атмосферы, по-видимому, можно рассматривать как компонент ландшафта. Его мощность можно примерно оценить через влажноадиабатический градиент в  $0.6^\circ$  на 100 м. Естественно, что его условная верхняя граница тем выше, чем выше температура, и изменяется от первых десятков метров (в лесах зимой и на безлесных территориях с более сухим воздухом) до 1000 м над лесом в наиболее жаркие дни при среднем около 300 м. Конечно, по измерению в одной точке можно, в лучшем случае, говорить о факте измерения теплового потока спутником Landsat не от собственно лесного покрова, а от некоторого связанного с ним приземного слоя атмосферы. Вместе с тем, интерпретация всех последующих результатов должна учитывать рассмотренное фундаментальное и физически понятное соотношение.

Как следует из рис. 2 размерность пространства двадцати пяти переменных составляет девять компонент, которые в совокупности описывают 87.8% варьирования. Однако первое резкое отклонение от случайного процесса соответствует двум первым компонентам, которые описывают 65% варьирования. Принимаем во внимание тот факт, что в анализ включены измерения за очень большой временной интервал, за который в охранной зоне появлялись



**Рис. 1.** Соотношение температуры, измеренной с Landsat, с температурой и тепловым потоком, измеренными на вышке в еловом лесу.



**Рис. 2.** Оценка размерности пространства варьирования температуры по методу осыпи. 1 – описываемое варьирование в процентах, 2 – модель случайного процесса.

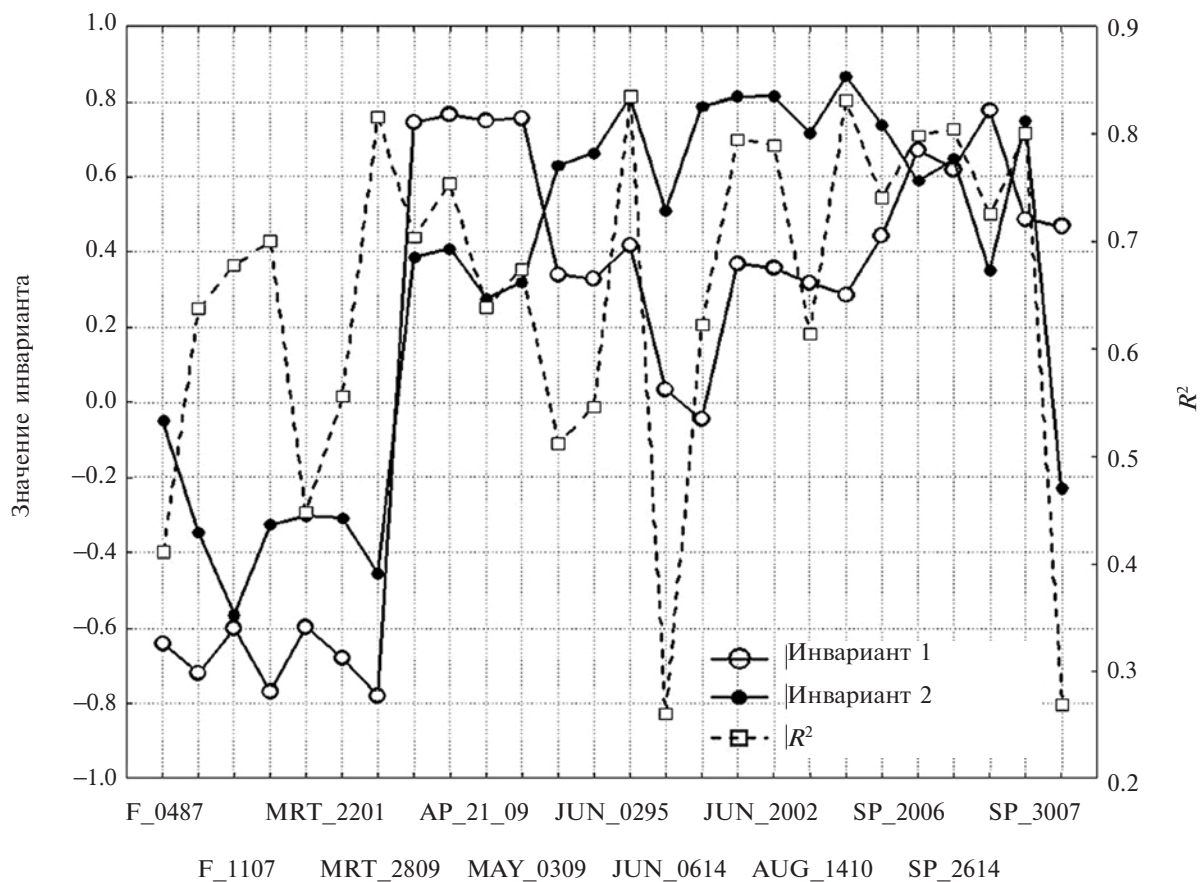


Рис. 3. Временная динамика стандартизованных коэффициентов регрессии для первых двух компонентов.

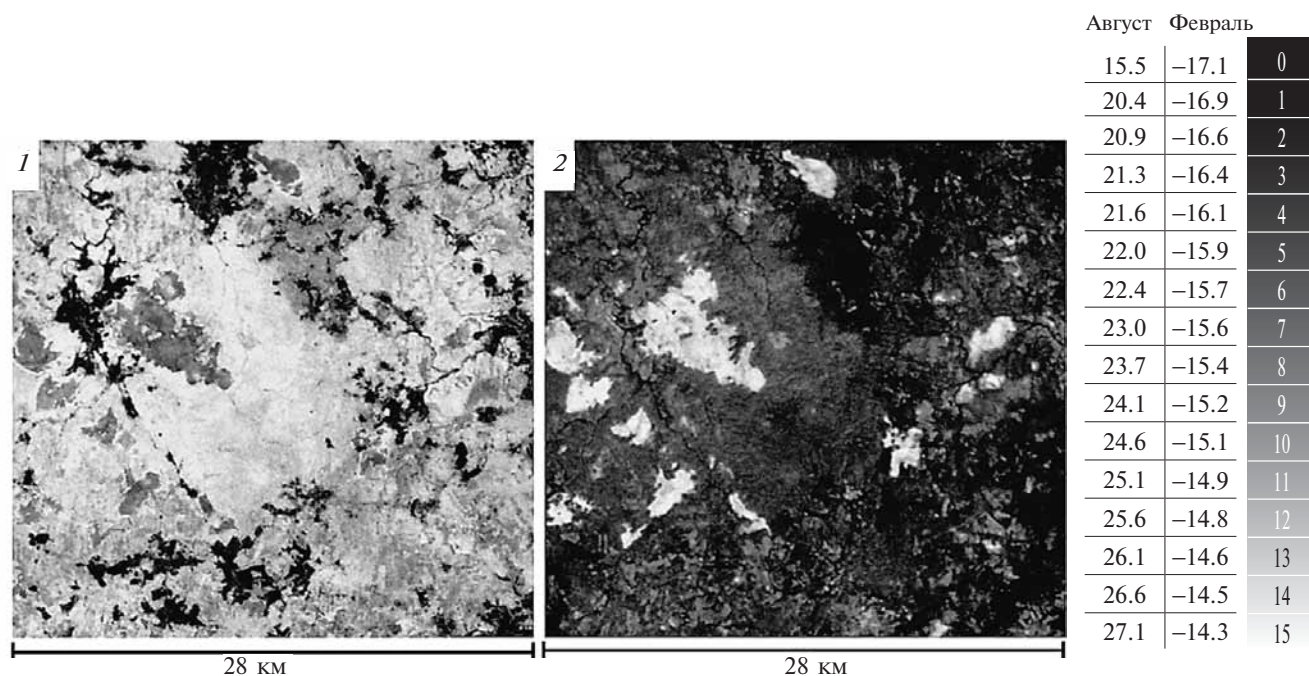


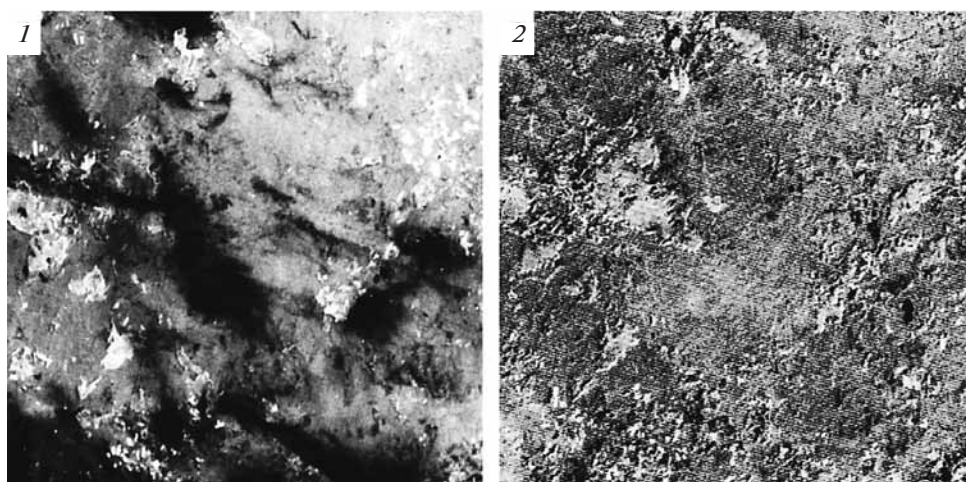
Рис. 4. Пространственное варьирование двух первых инвариантов, отражающих поле температур зимой (1) и летом (2), приведенных к температуре самого холодного и самого теплого сроков измерения.

вырубки, а на территории заповедного ядра в 1987 и 1996 гг. прошло два мощных ветровала, существенно изменивших состояние термодинамически активной поверхности. В каждой сцене Landsat наблюдается существенный шум, связанный с ошибками съемочной аппаратуры. Поэтому для описания поля температур ограничимся двумя первыми инвариантами. На рис. 3 приведена сезонная динамика стандартизованных коэффициентов регрессии первых двух пространственных инвариантов (компонентов), каждая из которых описывает по 32% общего варьирования поля температур за все сроки наблюдения.

Физический смысл каждого инварианта можно определить по максимальным абсолютным значениям коэффициентов регрессии. Соответственно, первый инвариант отражает в первую очередь температурное поле в зимние и весенние месяцы. При этом, в феврале–марте большим значениям первой компоненты будут соответствовать наиболее низкие температуры, а в апреле и начале мая, напротив, наиболее высокие. Второй компонент связан положительно с летними температурами. Коэффициент детерминации варьирует в широких пределах от 0.26 до 0.83 при среднем 0.652. Рассчитаем на этой основе значения двух временных инвариантов в пространстве (рис. 4) и приведем их к температуре соответствующих месяцев. Как следует из рис. 4, в зимнее время наиболее холодными являются безлесные территории: населенные пункты, сельскохозяйственные земли, верховые болота и речные долины. При этом верховые болота и речные долины существенно “теплее” сельскохозяйственных земель, а наиболее теплые связаны с лесами, сре-

ди которых наиболее теплыми являются старые зеленомошные, кисличные, черничные, чернично-кисличные и сфагново-черничные ельники, а наименее – неморальные (с липой, кленом, вязом) и широколиственные (с дубравными видами). Противоположная ситуация наблюдается в летние месяцы, слой атмосферы над лесом имеет существенно более низкие температуры, чем над безлесными территориями, единственное исключение – речные долины, которые в течение всего года остаются относительно холодными. В целом, для второго инварианта характерно большее варьирование температуры, отдельные участки верховых болот теплее “ельников” почти на 10°C, в то время как в зимние месяцы эта разница по модулю не превышает 3°C.

На рис. 5 показаны отклонения поля температуры от регрессионной модели от двух инвариантов для сроков с минимальным и максимальным коэффициентами детерминации. Из рис. 5.1 следует, что в момент измерения территория была перекрыта дымкой, прозрачной для видимых каналов солнечного спектра. Дымка сама по себе имеет сложную пространственную структуру с температурами от 6°C (темный тон) до 29°C (светлый тон). Через дымку, по-видимому, при ее минимальной плотности просвечивают очень теплые фрагменты верховых болот и части безлесных территорий. При высоком коэффициенте детерминации и соответственно высокой прозрачности для теплового потока атмосферы (рис. 5.2) амплитуда температур остатков существенно меньше, чем в первом случае. Общий фон создают дефекты сканера. Положительные отклонения в основном связаны с болотами и в меньшей степени с безлесными территориями. Весьма характерно, что к наиболее теплым



**Рис. 5.** Отклонения двух инвариантов от регрессионной модели.

1 – 6 июня 2014 г. с  $R^2 = 0.261$ . Амплитуда температуры 6–29°C. 2 – 3 июня 2007 г. с  $R^2 = 0.834$ . Амплитуда температуры 5–16°C. Светлому тону соответствуют высокие температуры, темному – низкие.

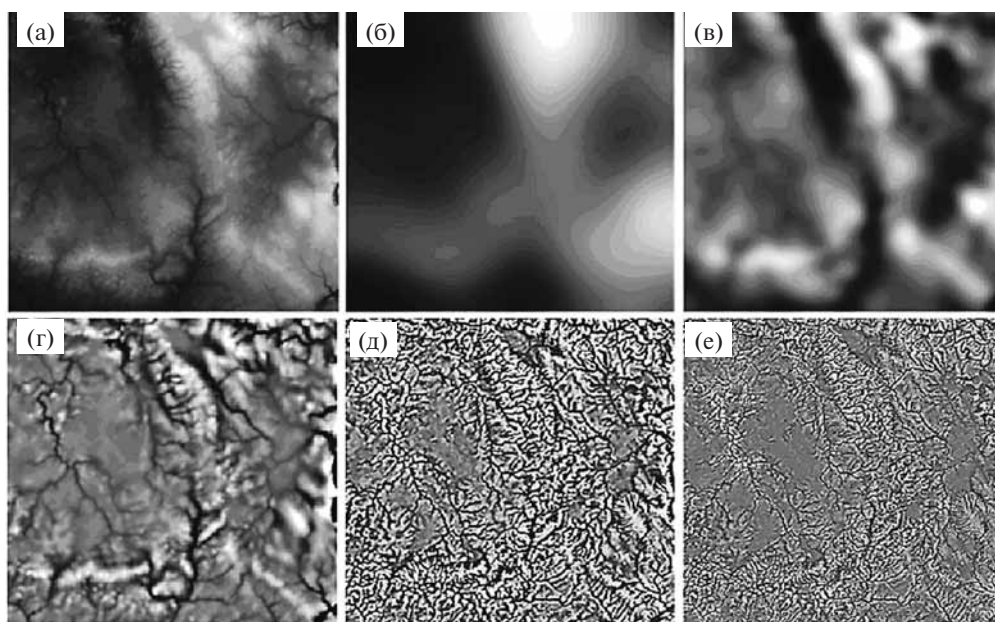


участкам примыкают наиболее холодные.

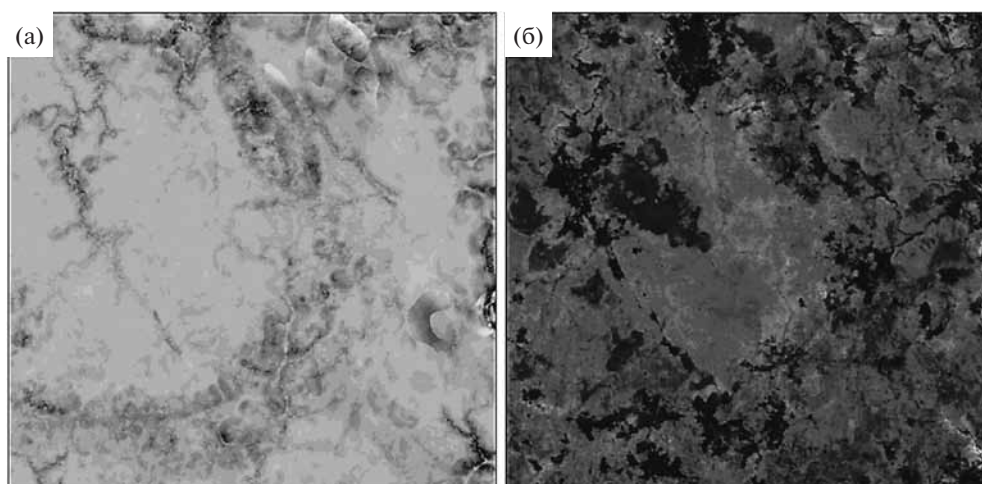
В целом, пространственное варьирование поля температуры, по-видимому, отражает элементы собственных конвекционных процессов, влияющих на содержание влаги в приземном слое атмосферы. Детальный анализ отклонений от стационарного состояния, отражаемого в инвариантах, выходит за рамки предлагаемой работы. Таким образом, выделенные инварианты действительно отражают, “среднее статистическое” состояние теплового поля, а отклонения — особенности его формирования в каждый срок наблюдения, то есть элементы поведения динамической системы.

**Зависимость инвариантов структуры теплового поля от рельефа.** На рис. 6 приведены пять уровней организации рельефа. Зимний инвариант описывается рельефом на 22% с амплитудой от  $-17.8$  до  $-13.7$  и летний — на 26% с амплитудой от  $15.13$  до  $27.97$ .

Температурное поле описывается семнадцатью переменными рельефа, принадлежащими разным иерархическим уровням: четыре принадлежат уровню с линейными размерами  $3.8$  км, пять —  $1$  км, два —  $0.45$  км, два —  $0.27$  км, два —  $0.15$  км и два —  $30$  м. Основной вклад в описание инварианта зимнего теплового поля вносят с отрицательным знаком поперечная кривиз-



**Рис. 6.** Иерархические уровни организации рельефа: (а) — рельеф территории; (б) —  $3810/80$  м; (в) —  $1050/50$  м; (г) —  $450/30$  м; (д) —  $270/15$  м; (е) —  $150/5$  м.



**Рис. 7.** Влияние рельефа (зима)  $R^2=0.22$ : (а) — тепловое поле, описанное рельефом; (б) — тепловое поле, не описанное рельефом.

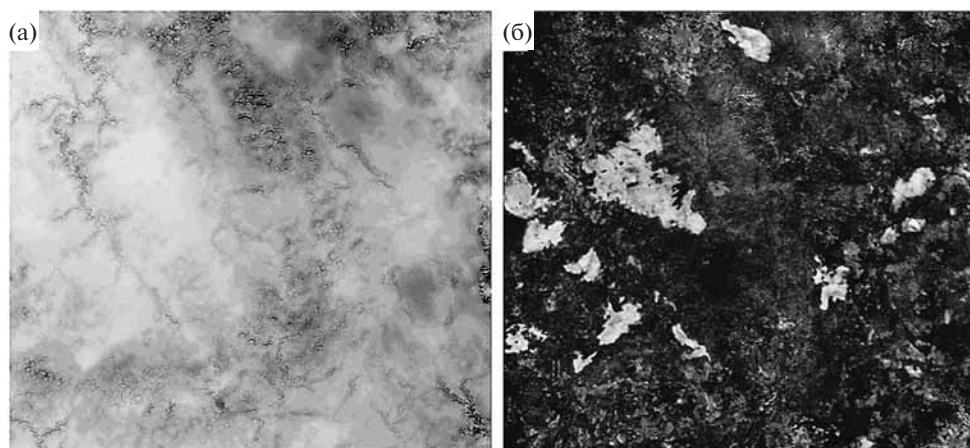
Светлому тону соответствуют высокие температуры, светлому — низкие.

на на уровне макрорельефа (3.8 км), крутизна склона на уровне 3.8 км и 0.27 км и максимальная кривизна на уровне 0.45 км. Положительно влияет минимальная кривизна на уровне 150 м. Таким образом, чем круче склоны и больше поперечная и максимальная кривизна, тем ниже температура и чем больше минимальная кривизна, тем выше. Из рис. 7 следует, что в соответствии с этим, минимальные температуры под влиянием рельефа выделяют вогнутые линейные формы на моренных грядах, которые имеют наиболее низкую температуру, маркируя ложбины стока холодного воздуха. Точно так же наиболее холодными являются долины рек. В целом же, влияние поперечного профиля определяет несколько более холодный фон для моренных гряд. При визуальном анализе остатков от модели рельефа, наряду с очевид-

ной связью их с растительным покровом, повышенные температуры отмечаются вдоль речных русел и у подножья моренных гряд. Этот эффект можно объяснить влиянием близкого залегания грунтовых вод, увеличивающих тепловой поток в атмосферу.

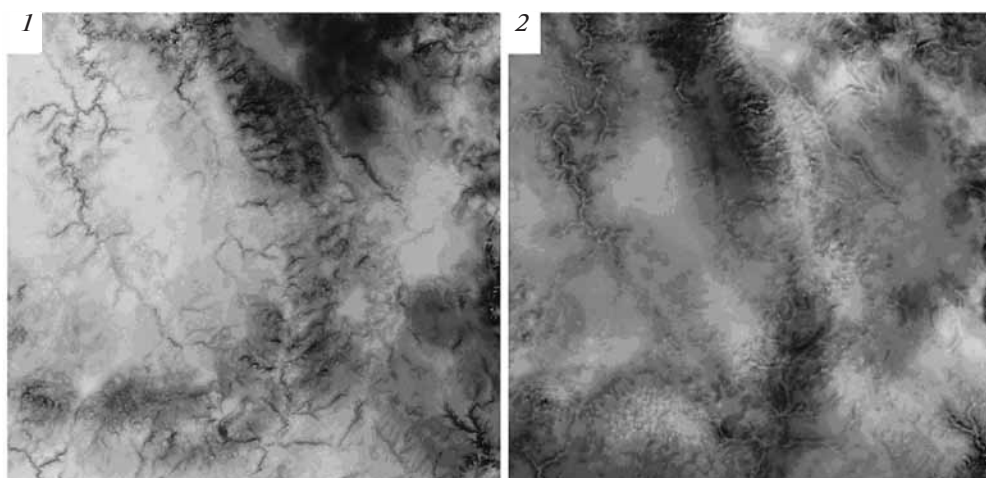
Летний инвариант в пошаговом регрессионном анализе описывается двадцатью пятью переменными рельефа, но визуальное его изменение в пространстве весьма подобно зимнему (рис. 8). Для того чтобы разобраться со спецификой действия на поле температуры различных элементов рельефа, обратимся к дискриминантному анализу, в осях которого лучше отражаются частные отношения между определяемой и внешними переменными.

Для этого переведем значения фактора в целочисленную дискретную форму и будем дис-



**Рис. 8.** Влияние рельефа (лето)  $R^2=0.268$ : а – тепловое поле, описанное рельефом; б – тепловое поле, не описанное рельефом.

Светлому тону соответствуют высокие температуры, темному – низкие.



**Рис. 9.** Поле температур, описываемое рельефом, представленное двумя осями дискриминантного анализа. Ось 1 – 24.72%; ось 2 – 2%.

криминировать всеми переменными рельефа. В дискриминантном анализе летняя инварианта раскладывается на десять осей, описывающих варьирование теплового поля с коэффициентом детерминации – 0.268291, как и пошаговый мультирегрессионный анализ. Более того, вклад большинства осей ничтожен и две первые описывают варьирование с коэффициентом детерминации 0.268195. Таким образом, чтобы распутать формы влияния на температурное поле морфометрических переменных рельефа достаточно исследовать отношения для первых двух осей, представленных на рис. 8. Первая ось описывает 24.72%, а вторая 2% варьирования. Как следует из табл. 2, первая ось положительно определяется максимальными кривизнами и уклонами всех иерархических уровней кроме максимального. Следовательно, чем круче склон и больше максимальная кривизна, тем ниже температура. Эта зависимость хорошо выражена на рис. 9.1. В целом же, наибольший вклад в формирование поля температур вносит абсолютная высота над уровнем моря и высота макрорельефа.

Вторая ось (рис. 9.2) в отличие от первой определяет положительное изменение температуры с высотой при той же самой форме зависимости от уклонов и кривизны до уровня в 1 км. Дополнительно заметный положительный вклад

вносит освещенность с востока. Характерно, что максимальная и минимальная кривизны макрорельефа определяют увеличение температуры. Положительное влияние одновременно максимальной и минимальной кривизны, скорее всего, определяется нелинейной зависимостью поля температур от кривизн на уровне макрорельефа. Это влияние хорошо видно при сравнении изображений первой и второй оси, у которых в целом не совпадают области низких и высоких значений инвариантов, определяемых ими. Можно полагать, что вторая ось отражает эффекты нелинейных зависимостей поля летних температур от высоты и макроструктуры рельефа.

**Зависимость инвариантов структуры теплового поля от растительности.** На основе регрессионного и дискриминантного анализа остатки от модели рельефа для зимнего инварианта определяются растительностью с  $R^2 = 0.537$ . На рис. 10 показаны характерные соотношения между четырьмя характеристиками растительности и температурой. В результате получаем, что леса с наибольшей высотой, высоким проективным покрытием травяного яруса и подлеска, то есть старые и наиболее “богатые” леса, связаны с наиболее высокими зимними температурами. По мере снижения температур снижается проективное покрытие подлеска и трав и увеличивается проективное покрытие

**Таблица 2.** Корреляции морфометрических переменных с двумя первыми осями дискриминантного анализа, описывающими летний инвариант температур

Иерархический уровень рельефа (линейные размеры)	Переменная	Корреляция	
		Первая ось	Вторая ось
1 (30 м)	Высота	-0.747	0.497
1 (30 м)	Уклон	-0.538	-0.337
1 (30 м)	Максимальная кривизна	-0.278	-0.236
5 (150 м)	Уклон	-0.428	-0.300
5 (150 м)	Максимальная кривизна	-0.269	-0.219
9 (270 м)	Уклон	-0.450	-0.378
9 (270 м)	Максимальная кривизна	-0.241	-0.293
15 (450 м)	Уклон	-0.451	-0.423
15 (450 м)	Максимальная кривизна	-0.212	-0.343
35 (1050 м)	Уклон	-0.485	-0.331
35 (1050 м)	Максимальная кривизна	-0.243	-0.250
127 (3810 м)	Высота	-0.370	0.570
127 (3810 м)	Уклон	-0.637	–
127 (3810 м)	Лапласиан	-0.223	0.328
127 (3810 м)	Освещенность с востока	–	0.200
127 (3810 м)	Минимальная кривизна	–	0.303
127 (3810 м)	Максимальная кривизна	0.470	0.230

травяного яруса. В интервале  $-14.5 - -15.5^{\circ}\text{C}$  высота леса линейно снижается. Минимальная температура характерна при отсутствии леса с господством мхов (в основном сфагнума) или трав. Полученные отношения позволяют полагать, что наиболее старые и высокополнотные богатые леса поддерживают относительно высокие зимние температуры, молодые и угнетенные леса с развитым травяным и моховым

покровом – средние, а безлесные территории и болота – самые холодные. Летний инвариант (рис. 11) в большей степени определяется состоянием растительности ( $R^2 = 0.68$ ), чем зимний, а соотношения температуры и характеристик растительности обратные: чем больше высота леса, тем ниже температуры и чем выше проективное покрытие мхов, тем температуры выше. Высокому проективному покрытию травяного

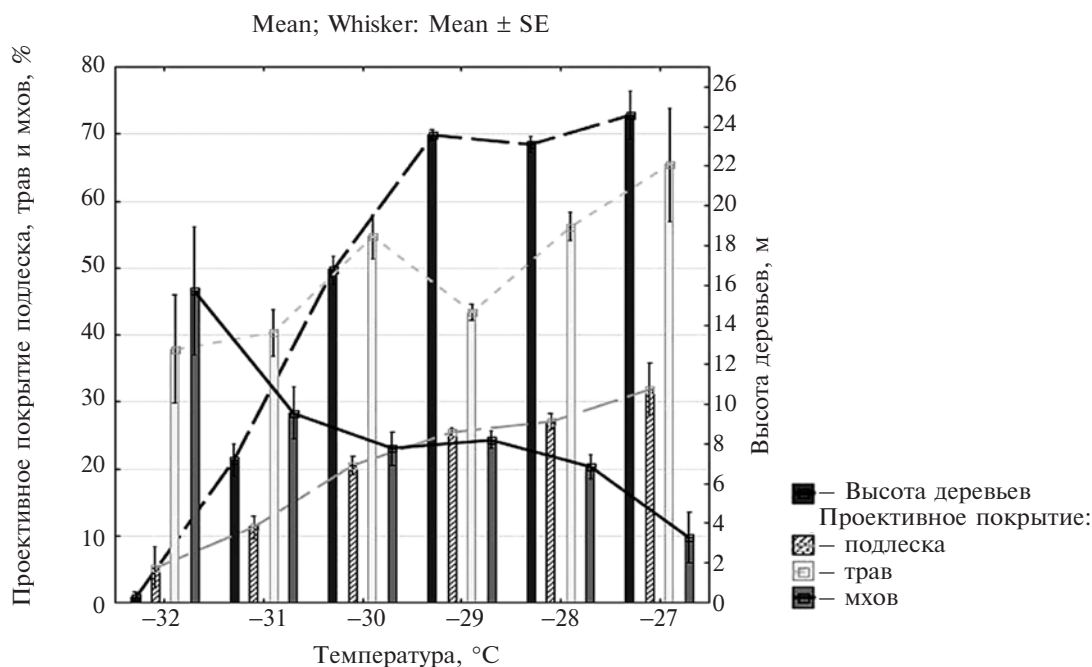


Рис. 10. Соотношение свойств растительного покрова и температуры зимой.

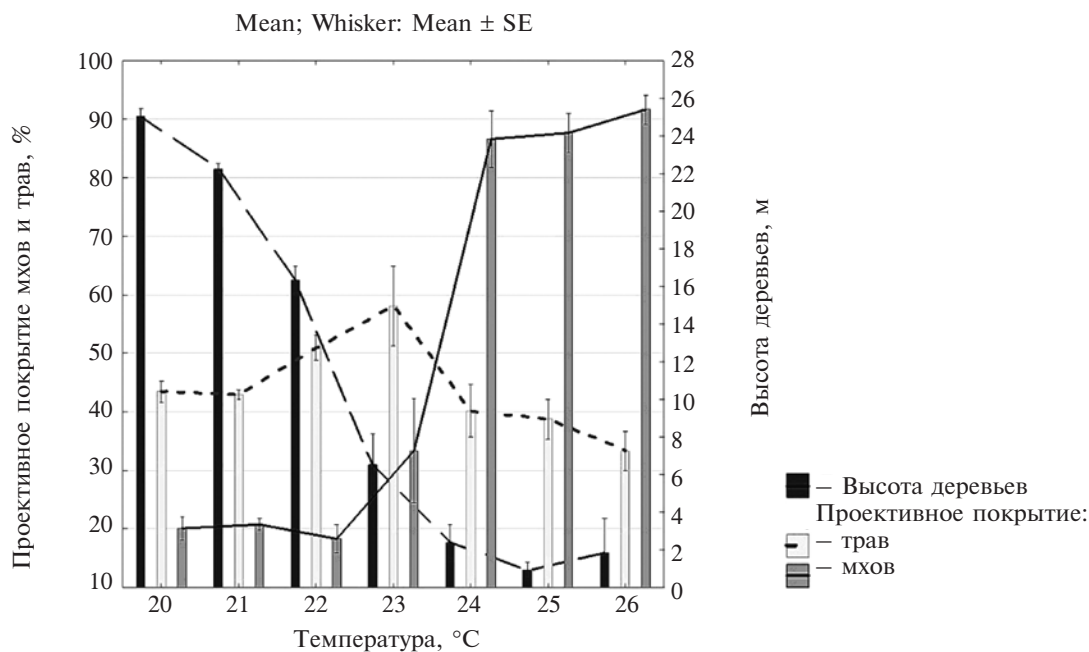
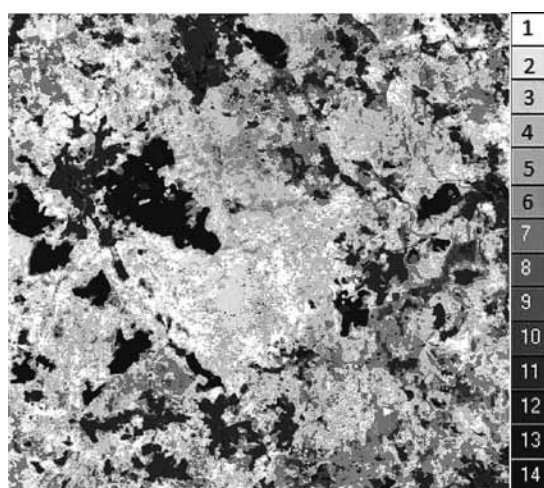


Рис. 11. Соотношение свойств растительного покрова и температуры летом.

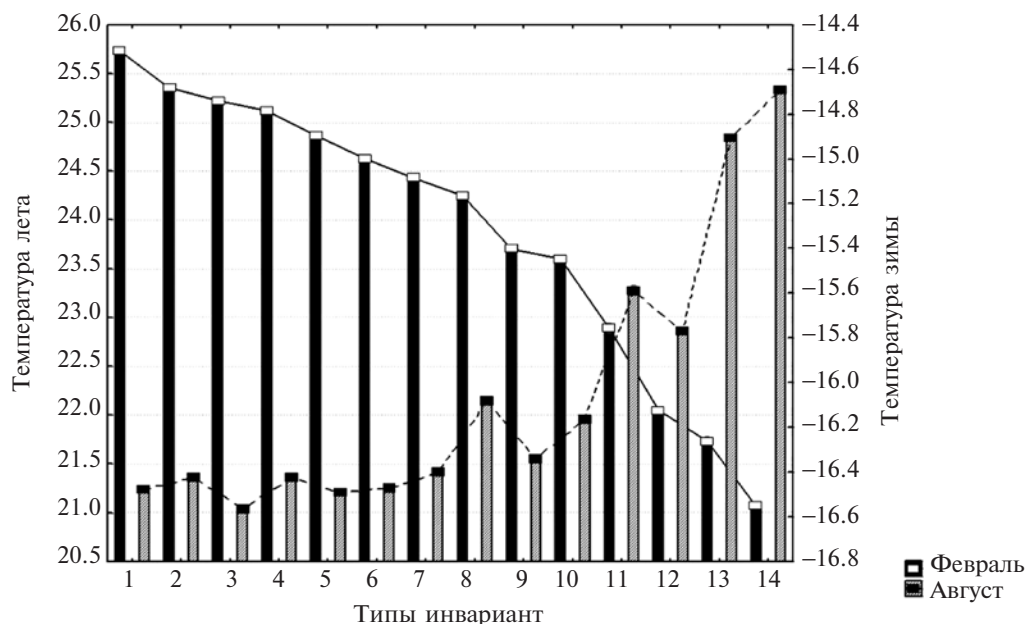
яруса соответствуют средние температуры. Таким образом, развитый лес снижает температуру приземного слоя атмосферы, луга и в большей степени верховые болота, напротив, повышают. Летом детерминация теплового поля, отображаемого рельефом и растительностью (для выборки последней) – 78.3%, при этом рельеф определяет 32.4% варьирования, а растительность – 75%. Пространственное варьирование зимнего инварианта описывается рельефом и растительностью на 72.6%, собственно растительностью на 65.4% и рельефом на 22.6%. В целом, это вполне удовлетворительный уровень детерминации теплового поля, показывающий ведущее значение в его формировании растительного покрова и в

меньшей степени рельефа. Однако нельзя исключить существование автохтонных механизмов его формирования.

**Пространственное варьирование теплового поля, не зависящее от рельефа и состояния растительности.** Чтобы выделить хотя бы на качественном уровне автохтонную составляющую формирования теплового поля, используя классификацию, выделим типы для инвариантов свободных от влияния рельефа, исследуем с помощью дискриминантного анализа их зависимость от растительности и пространственное размещение конкретных типов. Число типов подобрано таким образом, чтобы обеспечить читаемость рисунка в серой шкале



**Рис. 12.** Классификация тепловых полей без учета влияния рельефа. Светлому тону соответствуют высокие температуры, темному – низкие.



**Рис. 13.** Значения инвариантов, преобразованных в температуры самого теплого и самого холодного сроков наблюдения (по зимним температурам).

и отобразить наиболее характерные черты пространственного варьирования теплового поля.

На рис. 12 приведены четырнадцать типов инвариантов теплового поля, порядок которых определен по зимней температуре рис. 13. Первому типу инвариантов соответствуют участки наиболее теплые зимой и холодные летом (леса), четырнадцатому – наиболее холодные зимой и наиболее теплые летом верховые болота. Аграрные земли соответствуют двенадцатому типу. Дискриминантный анализ показал, что растительность описывает зимний инвариант на 38.8% и летний на 16.2%, что существенно меньше, чем детерминации непосредственно каждого

инварианта. Это, скорее всего, определяется относительной грубостью и обобщенными отношениями, полученными в результате классификации. Дискриминантный анализ показывает, что все инварианты, связанные с лесами, с первой по седьмую описываются на 40–50%, верховое болото – на 86%, а близкий к нему тринадцатый тип на 60%. Остальные типы слабо определяются растительностью (менее 35%). Прямой анализ рис. 12 позволяет выделить инварианты, связанные с границами болот и сельскохозяйственных земель (рис. 14). Можно выделить границы “болотного” с наиболее высокой летней температурой (см. рис. 12, 13) и лесного с наиболее

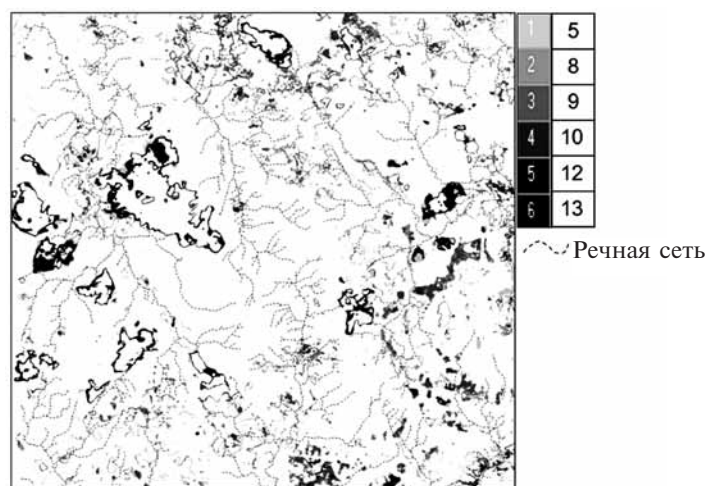


Рис. 14. Шесть типов инвариантов, выделяющих границы верховых болот и сельскохозяйственных земель.

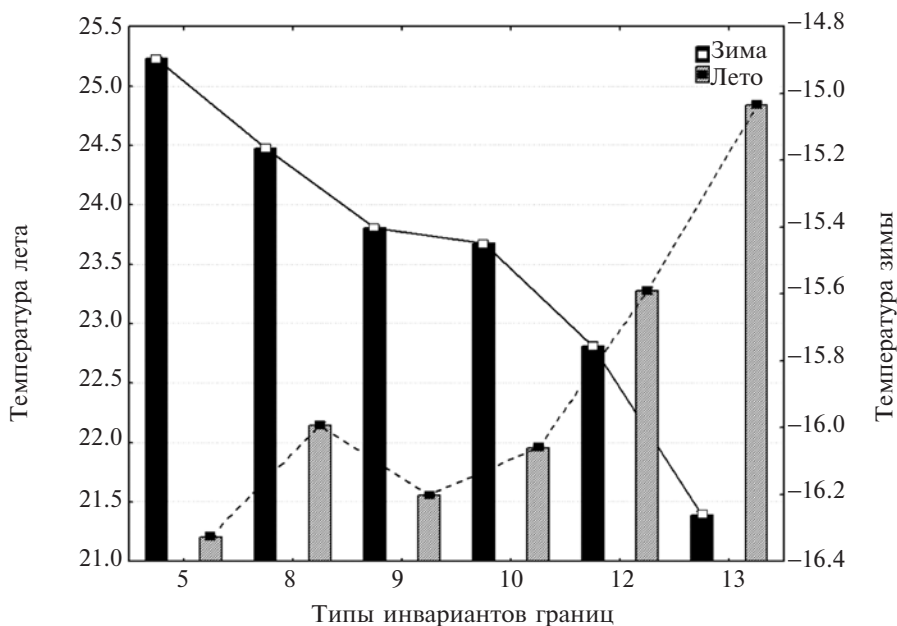


Рис. 15. Значения инвариантов, преобразованных в температуры самого теплого и самого холодного сроков наблюдения, упорядоченные по зимним температурам.

низкой (рис. 15). Остальные четыре граничные типы инвариантов отражают в среднем постепенное увеличение вклада “лесного” соотношения зимнего и летнего инварианта, иначе говоря, лесного микроклимата. Сельскохозяйственные земли ограничиваются девятым типом инварианта с относительно низкой летней температурой. Таким образом, можно утверждать, что между термодинамически контрастными ландшафтами в тепловом поле существуют переходные зоны, слабо связанные с растительностью. Каждый из инвариантов обычно не является полностью замкнутым. Переходные области могут иметь различную ширину и сложность. Их формирование можно рассматривать как автохтонный фактор взаимодействия микроклиматов, в первую очередь болот и леса. Вместе с тем, визуальный анализ центральной части рис. 12, соответствующей естественным лесам, показывает достаточно сложную структуру теплового поля, которую трудно объяснить структурой растительного покрова. Для исследования этого варьирования нужно рассмотреть иерархическую организацию инвариантов, что будет темой следующей статьи.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В синергетике [10] рассматриваются параметры порядка и управляющие переменные. Первые с некоторым приближением описывают стационарную пространственную динамику системы во времени, вторые определяют динамику параметров порядка. Параметры порядка на некотором временном интервале остаются неизменными и потому могут быть определены как инварианты, в нашем случае — инварианты теплового поля ландшафта. Они позволяют представить множество измерений, осуществленных во времени, через небольшое число переменных и коэффициенты регрессии при каждом из них (уравнение 2). Инварианты теплового поля ландшафта отражают стационарные пространственные градиенты температуры в некотором приземном слое атмосферы, определяя тем самым потенциальную пространственную структуру конвекции. Так как при одной и той же температуре сухой воздух тяжелее влажного, то стационарное состояние отражает гипотетическое равновесие между “холодными” и “теплыми” территориями, которое возможно лишь в том случае, если первые будут пропорционально содержать больше влаги, а вторые меньше. Очевидно, что это равновесие есть некоторое идеальное предельное состояние. Реальное состояние теплового поля управляется в общем случае приходом солнечной радиации, порождающим нелинейные конвекционные процессы, нарушающие гипотетические равновесные

отношения.

В нашем случае мы можем ожидать восходящие потоки воздуха над интенсивно транспирирующим лесом и нисходящие над верховыми болотами, лугами и аграрными землями с существенно меньшей эвапотранспирацией. Аналогичные ячейки, но меньшего масштаба должны возникать и над лесом. Эта реальная конвекция есть первый управляющий параметр, определяющий отклонение реальных измерений от регрессионной модели, получаемой через инварианты. Вторым управляющим параметром, безусловно, являются предшествующие моменту измерения погодные условия и свойства сменяющихся друг друга воздушных масс. Измерения теплового поля со спутника реализуемы только в условиях антициклона, и динамическая система будет приближаться к равновесию при его длительном влиянии на территорию. Реально же воздушные массы в наших условиях сменяют друг друга с периодом 4–10 дней и различная инерционность в реакции различных состояний растительного покрова существенно нарушают идеальные равновесные отношения, которые также находят отражение в отклонениях динамической системы от равновесия. Эта реальная динамика, безусловно, должна быть предметом исследования, но она требует достаточно больших временных рядов измерений со спутника. При этом рассчитанные инварианты позволяют исследовать именно отклонения от равновесия, описывая на их основе реальную динамику. Таким образом, инварианты создают в общем случае хорошую основу для исследования и реальной динамики. Более того на их основе, используя уравнение 2 можно рассчитать и временные инварианты, отображаемые через коэффициенты при соответствующих пространственных. Так в нашем случае

$$a_1^t = (0.09 \pm 0.02)m^t - (0.0002 \pm 0.00008)(m^t)^3 \text{ с } R^2 = 0.48, \quad (3)$$

$$a_2^t = (0.053 \pm 0.006)m^t \text{ с } R^2 = 0.61, \quad (4)$$

где  $m^t$  — средняя температура для всей территории.

Конечно, точность оценки температуры в каждом пикселе по заданной средней температуре в результате рассмотренных выше возмущений не высока, но для некоторых прикладных задач может быть вполне приемлемой.

В предлагаемом сообщении в явном виде рассматриваются две управляющих переменных: рельеф и растительный покров. Очевидно, что в реальном масштабе времени рельеф неизменен, в то время как растительность может существенно

меняться в результате саморазвития, катастрофических возмущений: пожаров, ветровалов, размножения насекомых, вредителей и т.п., а также хозяйственной деятельности человека.

На рассматриваемой территории типичны ветровалы, захватывающие большие площади и их влияние хорошо отражается в отклонениях от инвариантов. Более того, по самым ранним сценам (1986 г.) в отклонениях от инварианта хорошо идентифицируется горизонтальный рост площади верховых болот. Таким образом, зная влияние растительности на тепловое поле, можно рассчитать его изменение при различных хозяйственных воздействиях. Так, можно полагать, что крупномасштабные рубки леса приводят к увеличению средней летней температуры ландшафта, вполне соизмеримыми с глобальным потеплением.

Используемый метод анализа может применяться к временным сериям любых переменных мультиспектральных измерений и их различным преобразованиям. Так как каждая переменная имеет физический смысл, то ее представление через инварианты будет отражать их стационарное состояние. Инварианты могут быть хорошей основой для планирования соответствующих высокочастотных измерений в приземном слое атмосферы с применением беспилотников с соответствующей аппаратурой. Достаточно очевидны возможности их применения для решения прикладных задач в сельском и лесном хозяйстве и в целом в оценке различных экосистемных услуг. Таким образом, инварианты позволяют выделить наиболее устойчивые свойства ландшафта на заданном временном интервале.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-17-00129 (разработка методологии статьи) и гранта РГО-а 17-05-41069 (расчет инвариантов).

#### FUNDING

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 18-17-00129 (methodology) and the Russian Geographical Society (RGO-a), grant no. 17-05-41069 (calculations).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978. С. 19774.
2. Кабанов М.В. Некоторые закономерности климатических и экосистемных изменений в Сибири // Журнал Сиб. Фед. ун-та. Биология. 2008. Т. 1. № 4. С. 312–322.
3. Казаков А.А. Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // Вестн. Тюменского ун-та. Науки о Земле. 2013. № 4. С. 161–167.
4. Пузаченко Ю.Г. Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. № 5. 2010. С 6–16.
5. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: ACADEMIA. 2004. 416 с.
6. Пузаченко Ю.Г. Организация ландшафта // Вопр. географии. 2014. № 138. С. 35–65.
7. Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н. Геоморфологическая история развития региона. Комплексные исследования в Центральном-Лесном государственном природном биосферном заповеднике: их прошлое, настоящее и будущее // Матер. сов. Тр. Центрально-Лесного заповедника. Вып. 4. Тула: Гриф и К, 2007. С. 125–159.
8. Сочава В.Б. Учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1975. 39 с.
9. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности // М: Пер СЕ, 2001. 351 с.
10. Хакен Г. Синергетика. М: Изд. МИР, 1980. 405 с.
11. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник. Популярный очерк. М.: Изд. “Деловой мир”, 2007. 80 с.
12. Chen F., Yang S., Yin K., Chan P. Challenges to quantitative applications of Landsat observations for the urban thermal environment // Environ Sci (China). 2017. № 59. P. 80–88.
13. Nguyen-Thanh Son, Bui-Xuan Thanh Decadal assessment of urban sprawl and its effects on local temperature using Landsat data in Can Tho city, Vietnam // Sustainable Cities and Society. 2018. № 36. P. 81–91.
14. Fernandez-Manso A., Quintano C., Roberts D. Burn severity influence on post-fire vegetation cover resilience from Landsat MESMA fraction images time series in Mediterranean forest ecosystems // Remote Sens. Environ. 2016. № 184. P. 112–123.
15. Hais M., Kuchera T. The influence of topography on the forest surface temperature retrieved from Landsat TM, ETM+ and ASTER thermal channels // Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. № 64. P. 585–591.
16. Huang C.Y., Anderegg W.R.L. Vegetation and surface brightness dynamics after aspen forest die-off // Geoph. Research. 2014. № 119. P. 1297–1308.
17. Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems // Elsevier. 2004. 380 p.
18. Kang Yun Analysis of temperatures distribution of forest type class using Landsat imagery // ASPRS Annual Conference Milwaukee, Wisconsin. 2011. P. 8–16.



19. Puzachenko Yu., Sandler'sky R., Sankovskii A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite // *Entropy*. 2013. № 15. P. 3970–3982.
20. Puzachenko Y.G., Sandler'sky R.B., Svirejeva-Hopkins A. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing // *Ecol. Modell.* 2011. № 222. P. 2913–2923.
21. Ray T.W. A FAQ on Vegetation in Remote Sensing. URL. <ftp://kepler.gps.caltech.edu/pub/terrell.rsvefaq> (accessed 13.01.2019).
22. Vlassova L., Perez-Cabello F., Nieto H., Martín P., Riano D. Assessment of Methods for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat-5 TM Images Applicable to Multiscale Tree-Grass Ecosystem Modeling // *Remote Sens.* 2014. № 6. P. 4345–4368.
23. Wood J. *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*. Leicester, UK: Department of Geography, 1996. 466 p.
10. Haken H. *Synergetics. An Introduction*. Berlin: Springer, 1980. 450 p.
11. *Tsentr'al'no-Lesnoi gosudarstvennyi prirodnyi biosfernyi zapovednik. Populyarnyi ocherk* [Central-Forest State Nature Biosphere Reserve. A Popular Essay]. Moscow: Delovoi Mir Publ., 2007. 80 p.
12. Chen F., Yang S., Yin K., Chan P. Challenges to quantitative applications of Landsat observations for the urban thermal environment. *J. Environ. Sci.—China*, 2017, no. 59, pp. 80–88.
13. Son N.T., Thanh B.X. Decadal assessment of urban sprawl and its effects on local temperature using Landsat data in Cantho city, Vietnam. *Sustainable Cities and Society*, 2018, no. 36, pp. 81–91.
14. Fernandez-Manso A., Quintano C., Roberts D. Burn severity influence on post-fire vegetation cover resilience from Landsat MESMA fraction images time series in Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 2016, no. 184, pp. 112–123.
15. Hais M., Kuchera T. The influence of topography on the forest surface temperature retrieved from Landsat TM, ETM+ and ASTER thermal channels. *ISPRS J. Photogramm.*, 2018, no. 64, pp. 585–591.

## REFERENCES

1. *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya* [The Great Soviet Encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1969–1978. 19774 p.
2. Kabanov M. V. Some regularities of climatic and ecosystem changes in Siberia. *Zh. Sib. Fed. Univ., Biol.* 2008, vol. 1, no. 4, pp. 312–322.
3. Kazakov A. A. Remote geothermal sensing of Western Siberia bogs (the case of Tarmany marsh massif). *Tyumen St. Univ. Herald*, 2013, no. 4, pp. 161–167.
4. Puzachenko Yu.G. Invariants of the dynamic geosystem. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 5, pp. 6–16. (In Russ.).
5. Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Ecological and Geographical Research]. Moscow: ACADEMIA Publ., 2004. 416 p.
6. Puzachenko Yu.G. Organization of landscape. In *Voprosy geografii. Sb. 138: Gorizonty landshaftovedeniya* [Problems of Geography. Vol. 137: Landscape Science Horizons]. Moscow: Kodeks Publ., 2014, pp. 35–65. (In Russ.).
7. Puzachenko Yu.G., Kozlov D.N. Geomorphological history of the region. Integrated research in the Central-Forest State Nature Biosphere Reserve: their past, present and future. In *Tr. Tsentr'al'no-Lesnogo zapovednika* [Proceedings of the Central Forest Reserve]. Tula, 2007, vol. 4, pp. 125–159. (In Russ.).
8. Sochava V.B. *Uchenie o geosistemakh* [The Doctrine of Geosystems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1975. 39 p.
9. Haken H. *Principles of Brain Functioning: A Synergetic Approach to Brain Activity*. Berlin, New York: Springer, 2001. 351 p.
16. Huang C.Y., Anderegg W.R.L. Vegetation, land surface brightness, and temperature dynamics after aspen forest die off. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, no. 7, pp. 1297–1308.
17. Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Elsevier, 2004. 380 p.
18. Kang J.M., Yun H.C., Park J.K. Analysis of temperatures distribution of forest type class using Landsat imagery. *ASPRS Annual Conference*, Milwaukee, 2011, pp. 8–16.
19. Puzachenko Y., Sandler'sky R., Sankovskii A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite. *Entropy*, 2013, no. 15(9), pp. 3970–3982.
20. Puzachenko Y.G., Sandler'sky R.B., Svirejeva-Hopkins A. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing. *Ecol. Modell.*, 2011, no. 222, pp. 2913–2923.
21. Ray T.W. *A FAQ on Vegetation in Remote Sensing*. California Institute of Technology, 1994. Available at: [http://www.remote-sensing.info/wp-content/uploads/2012/07/A\\_FAQ\\_on\\_Vegetation\\_in\\_Remote\\_Sensing.pdf](http://www.remote-sensing.info/wp-content/uploads/2012/07/A_FAQ_on_Vegetation_in_Remote_Sensing.pdf) (accessed 13.01.2019).
22. Vlassova L., Perez-Cabello F., Nieto H., Martín P., Riano D. Assessment of Methods for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat-5 TM Images Applicable to Multiscale Tree-Grass Ecosystem Modeling. *Remote Sens.*, 2014, no. 6, pp. 4345–4368.
23. Wood J. *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*. Leicester: University of Leicester, 1996. 466 p.

## Thermal Field of the Southern Taiga Landscape of the Russian Plain

**Yu. G. Puzachenko<sup>1</sup>, A. S. Baibar<sup>2,\*</sup>, A. V. Varlagin<sup>1</sup>, R. B. Sandler<sup>1</sup>,  
and A. N. Krenke<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\**e-mail: baybaranastasia@yandex.ru*

Received July 12, 2018; revised September 12, 2018; accepted November 30, 2018

The technology of allocation of order parameters (invariants) of the spatial structure of the thermal field of the southern taiga landscape (Central Forest Nature Reserve) obtained on the basis of the analysis of the time series of measurements in the long-wave channel of Landsat satellites from 1986 to 2017 and reflecting its stationary state is considered. It is shown that the heat flux is measured by the satellite not directly from the forest crowns, but from the ground layer of the atmosphere, the state of which is determined by the parameters of the landscape. It is found that the invariant component of the spatiotemporal variation of the thermal field is displayed by two order parameters: the first mainly reflects the temperature of winter months, the second – of summer. The contribution of relief and vegetation to the determination of invariants and the autochthonous components of the thermal field determined by the transition zones between the landscape elements contrasting in thermal radiation are revealed. It is shown that the thermal field measured by the satellite reflects the heat flux from the ground layer of the atmosphere, which is in direct interaction with the landscape cover.

**Keywords:** thermal (temperature) field, forest, landscape, order parameters, invariant, synergetics, Landsat.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019251-68>