

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКОСИСТЕМ ЦЕНТРАЛЬНО-  
ЛЕСНОГО ЗАПОВЕДНИКА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**  
**THE ENERGETIC CHARACTERISTICS OF CENTRAL-FOREST RESERVE  
GEOSYSTEMS BASED ON REMOTE SENSING DATA**

**Сандлерский Р. Б., Пузаченко Ю. Г.**

Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва

srobert\_landy@mail.ru, puzak@orc.ru

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, № 06-05-64937-а

Данные дистанционного зондирования отражают пространственное варьирование энергетического состояния земной поверхности. Отраженное солнечное излучение, регистрируемое спектрально-зональными сенсорами, в сопоставлении с солнечной постоянной, позволяет рассчитать энергию, поглощенную экосистемой. По тепловым каналам сенсоров рассчитывается собственное длинноволновое излучение земной поверхности и ее температура. Существующие подходы термодинамики позволяют оценить основные составляющие энергетического баланса ландшафта: *поглощенную энергию*, *эксергию солнечной радиации* – энергию идущую на осуществление круговорота влаги и производство биологической продукции, *связанную энергию* – переход энергии в тепловой поток и энтропию, приращение *внутренней энергии* – аккумуляция энергии системой, идущей возможно на поддержание межкомпонентных и межвидовых взаимодействий, локальные круговороты (почвообразовательные процессы, накопление углерода).

Для территории Центрально-лесного заповедника и его охранной зоны по спектрально-зональной съемке Landsat с пространственным разрешением 28.5x28.5 м, для пяти сроков (март, апрель, май, июнь, сентябрь) рассчитаны следующие энергетические характеристики: приходящая солнечная энергия, отраженная солнечная энергия, поглощенная энергия (радиационный баланс), альбедо, неравновесность преобразования солнечной энергии – энтропия Кульбака, эксергия солнечной радиации, энтропия отраженной солнечной энергии, тепловой поток и температура деятельной поверхности, связанная энергия, приращение внутренней энергии, индекс продуктивности.

Методика расчета отраженной солнечной энергии по спектрально-зональной сканерной съемке Landsat (спектральные диапазоны каналов 450 – 2350 нм) изложена в соответствующих руководствах (Landsat 7 Science Data Users Handbook, <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov>): значения яркостей снимка в канале пересчитываются в поток излучения отраженного земной поверхностью ( $\text{Вт/м}^2$ ), приход энергии оценивается по солнечной постоянной, поглощенная энергия – разность между пришедшей и отраженной энергией. По тепловому длинноволновому каналу (10120 – 14500 нм) рассчитывается тепловой поток ( $\text{Вт/м}^2$ ) и температура деятельной поверхности ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Расчет энергетических характеристик территории осуществлен по методике предложенной S. E. Jorgensen и Y. M. Svirezhev (2004). Измерение эксергии по мультиспектральной съемке осуществляется через дистанцию между распределением энергии по спектру поглощенной солнечной энергии и равновесным состоянием, с гипотетическим поглощением солнечной энергии пропорционально распределению энергии в спектре солнечной постоянной. Степень отклонения реального спектра поглощения от равновесного оценивается как энтропия Кульбака (мера различия двух сравниваемых распределений и параметр открытых неравновесных термодинамических систем).

Энтропия Кульбака ( $K, \text{nit}$ ) рассчитывается по формуле:

$$K = \sum_{v=1}^6 p_v^{\text{out}} \ln \frac{p_v^{\text{out}}}{p_v^{\text{int}}},$$

$p_v^{int} = \frac{e_v^{int}}{E^{int}}$  - доля пришедшей энергии в спектральном диапазоне  $\nu$  от суммарной поступившей энергии ( $E^{int}$ , Вт/м<sup>2</sup>),

$p_v^{out} = \frac{e_v^{out}}{E^{out}}$  - доля отраженной энергии в спектральном диапазоне  $\nu$  от суммарной отраженной энергии ( $E^{out}$ , Вт/м<sup>2</sup>),

$e_v^{int}$  - пришедшая энергия в спектральном диапазоне  $\nu$ ,  $e_v^{out}$  - отраженная энергия в спектральном диапазоне  $\nu$ .

Эксергия солнечной энергии ( $E_x$ , Вт/м<sup>2</sup>):

$$E_x = E^{out}(K + \ln A) + B,$$

$A$  – альбедо,

$B$  – поглощенная энергия (Вт/м<sup>2</sup>).

Таким образом, эксергия рассчитывается как функция неравновесности преобразования энергии системой.

Связанная энергия ( $STW$ , Вт/м<sup>2</sup>nit) рассчитывается как произведение теплового потока ( $TW$ , Вт/м<sup>2</sup>) и энтропии отраженной солнечной энергии. Энтропия отраженной солнечной энергии ( $S_{out}$ , nit):

$$S_{out} = - \sum_{\nu=1}^6 p_{\nu}^{out} \ln p_{\nu}^{out}.$$

Приращение внутренней энергии ( $U$ , Вт/м<sup>2</sup>) оценивается как поглощенная энергия за вычетом эксергии и связанной энергии:

$$U = B - E_x - STW.$$

Для оценки непосредственных затрат энергии на биологическую продукцию использовалась разность отраженной энергии в красном и ближнем инфракрасном диапазонах – индекс продуктивности (вегетационный индекс).

Для проверки адекватности используемых термодинамических отношений для всех сроков наблюдений была проверена их выполняемость, в частности составляющих радиационного баланса – эксергии, связанной и внутренней энергии; Анализ, показал что, в целом, для территории рассматриваемые переменные и отношения между ними отвечают теоретическим представлениям. Результаты анализа так же свидетельствуют о принципиально иных отношениях энергетических переменных для вегетационного периода (удовлетворяют модели) и для периода со снежным покровом, когда тепловой поток и эксергия, прямо зависят от поглощенной солнечной энергии и независимы от степени неравновесности. Совместный анализ поглощенной солнечной энергии, эксергии и продуктивности, в зависимости от неравновесности преобразования энергии показывает, что эксергия определяется в основном, поглощенной солнечной энергией при минимальном вкладе неравновесности, а биологическая продуктивность зависит, в первую очередь, от неравновесности, то есть от величины энтропии Кульбака. Таким образом можно полагать, что эксергия – часть поглощенной солнечной энергии, определяет эвапотранспирацию, как физический процесс не связанный с степенью неравновесности системы и определяемый способностью конкретного растительного покрова транспортировать влагу из почвы в атмосферу.

В табл. 1 приведены средние значения основных термодинамических переменных для территории заповедника по пяти срокам измерения. Минимальные значения приходящей энергии соответствуют марту (22.03.2001, время 11:38) и сентябрю (27. 09. 2000, время 11:38), максимальное – июню (20. 06. 2002, время 11:41), средние – апрелю (27. 04. 2000, время 11:45) и маю (03. 05. 1990, время 10:28). Более низкое значение приходящей энергии в мае, чем в апреле, видимо, обусловлено высотой солнца (майский снимок выполнен на час раньше остальных). Альбедо максимально в марте при наличии снежного покрова и минимально в мае; сравнение полученных значений с традиционными

измерениями показывает, что они не выходят за пределы нормы для соответствующих сроков наблюдения. Сезонный ход поглощенной энергии соответствует ходу приходящей энергии. Абсолютные значения приходящей солнечной энергии в сопоставлении с стандартной солнечной постоянной –  $1368 \text{ Вт/м}^2$ , вполне адекватны учитывая утреннее время съемки с максимальной прозрачностью атмосферы и неполноту оцениваемого спектра.

Табл. 1 Сезонный ход термодинамических характеристик моренно-грядовой возвышенности с темнохвойными неморальными и бореальными лесами, верховыми болотами и сельскохозяйственными землями по склонам гряд и камовых холмов  
 $E^{\text{in}}$  – приходящая солнечная энергии ( $\text{Вт/м}^2$ ),  $B$  – поглощенная энергия ( $\text{Вт/м}^2$ ),  
 $E_x$  – эксергия солнечной энергии ( $\text{Вт/м}^2$ ),  $U$  – внутренняя энергия (приращение) ( $\text{Вт/м}^2$ ),  
 $K$  – энтропия Кульбака (nit),  $S_{\text{out}}$  – энтропия потока отраженной энергии (nit),  
 $TW$  – тепловой поток деятельной поверхности ( $\text{Вт/м}^2$ ),  
 $STW$  – связанная энергия ( $\text{Вт/м}^2\text{nit}$ ),  
 $T$  – температура деятельной поверхности ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $VI$  – индекс продуктивности ( $\text{Вт/м}^2$ ),

Месяц	Термодинамические характеристики								
	$E^{\text{in}}$	$B$	$E_x$	$U$	$K$	$S_{\text{out}}$	$STW$	$T$	$VI$
март	757.25	567.88	345.34	214.2	0.065	1.503	8.34	-4.75	7.34
апрель	1032.84	939.19	725.21	201.48	0.092	<b>1.605</b>	12.48	16.10	19.23
май	1013.36	937.390	750.19	175.00	0.093	<b>1.605</b>	12.19	15.55	16.09
июнь	<b>1175.93</b>	<b>1056.87</b>	<b>818.06</b>	226.41	<b>0.267</b>	1.412	<b>12.41</b>	<b>24.00</b>	<b>48.99</b>
сентябрь	726.94	660.73	467.03	182.39	0.114	1.559	11.39	10.17	17.34

Сезонное изменение характеристик баланса в целом соответствует ходу поглощенной энергии: энтропия системы преобразующей солнечную энергию минимальна летом в период максимальной биологической активности растительного покрова и в то же время максимальна энтропия Кульбака и величина биологической продукции. Эксергия и связанная энергия как и температура поверхности максимальны весной и летом и минимальны в марте при наличие снегового покрова. Биологическая продуктивность максимальна летом, минимальна в мае.

Для анализа пространственного варьирования энергетических характеристик были рассчитаны их средние значения для обобщенных типов ландшафтного покрова заповедника: хвойные леса, лиственные леса, вывалы, луга и сельскохозяйственные земли, верховые болота, а так же небольшие пруды антропогенного происхождения (эталонны максимального поглощения солнечной энергии).

На рис. 1 показан график сезонного варьирования средних значений поглощенной энергии, эксергии солнечной радиации и температуры деятельной поверхности. Общим для всех сезонов является максимальное поглощение энергии лесами и, в бесснежный период, прудами. Минимальное поглощение во все сезоны у лугов и болот. Во все сезоны поглощение возрастает по направлению вывалы – лиственные леса – хвойные леса. Пространственное варьирование эксергии солнечной радиации в целом подобно варьированию поглощенной солнечной энергии, но его масштаб больше. Это подобие особенно ярко выражено в марте и сентябре, однако в сентябре, при одном и том же количестве поглощенной энергии, эксергия для болот выше, чем для лугов. Апрель и май выделяются большим пространственным варьированием эксергии: на графике резко выделяются минимумы эксергии на лугах, притом, что эксергия болот приближается к эксергии вывалов. В июне минимум поглощения и, соответственно эксергии, наблюдается для болот. Практически в течение всего года, за исключением ранней весны, в

соответствие с теорией, эксергия отрицательно связана с температурой деятельной поверхности. В течение всего вегетационного периода, чем больше эксергия, тем меньше интенсивность теплового потока и, соответственно, температура. Абсолютный максимум температуры наблюдается летом на верховых болотах – средняя температура для них 28 °С.

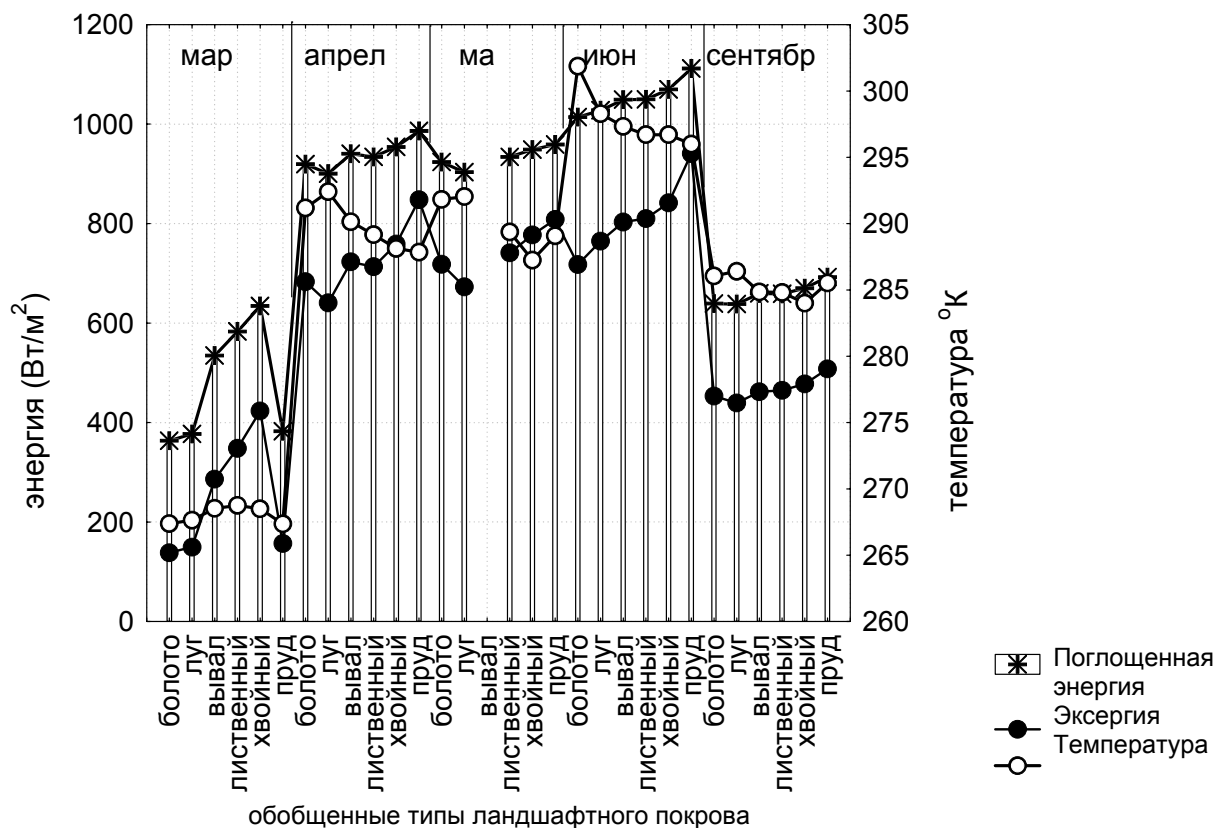


Рис. 1. Пространственно-временное варьирование поглощенной солнечной энергии, эксергии солнечной радиации и температуры

Пространственно-временное варьирование неравновесности преобразования солнечной энергии (по энтропии Кульбака), энтропии отраженной солнечной радиации и индекса продуктивности представлены на рис. 2. Изменение во времени и пространстве энтропии Кульбака как меры нестационарности системы полностью соответствует теоретическим представлениям. В целом преобразование солнечной радиации максимально неравновесно летом в период активного функционирования растительного покрова и максимально стационарно в марте. Весной максимально неравновесно преобразование энергии у болот и лиственных лесов, летом у лугов, вывалов и лиственных лесов, при относительном минимуме у болот, а осенью вновь максимально у болот. Варьирование энтропии отраженной солнечной радиации в целом обратно варьированию неравновесности преобразования энергии (для различных сезонов корреляция между ними составляет от -0.71, в апреле, до -0.96 в июле). Сезонная изменчивость энтропии показывает, что она определяется не только степенью неравновесности системы, но и приходом солнечной радиации: при низкой в целом энтропии Кульбака (зима, весна, осень) энтропия, тем больше, чем больше общий приход радиации. Продуктивность также тесно связана с неравновесностью преобразования энергии (рис. 2). Максимальная продуктивность отмечается летом на лугах и, в меньшей степени в лиственных лесах, в остальные месяцы вегетационного периода максимальна продуктивность на верховых болотах. На рис. 3 представлен график пространственно-

временного варьирования связанной энергии (переход поглощенной энергии в тепловое рассеяние и энтропию) и приращения внутренней энергии. В соответствии с теорией, чем более нестационарна система, тем меньше необратимые потери через связанную энергию. Это соотношение действительно выполняется, и зависимость между связанной энергией и неравновесностью по энтропии Кульбака (рис. 2) наиболее выражена летом. Вместе с тем сезонные различия в пространственном варьировании связанной энергии довольно существенны: в марте – максимальная связанная энергия продуцируется на вывалах и лиственных лесах, весной и осенью – на лугах и вывалах, летом на болотах. Таким образом, потери энергии с тепловым потоком и энтропией максимальны на лугах и, в меньшей степени на болотах, а минимальны в лесах. Пространственно-временное варьирование приращения внутренней энергии (аккумуляция энергии системой) в целом подобно варьированию связанной энергии – зимой наибольшее ее продуцирование характерно для вывалов и лиственных лесов, весной и осенью она максимальна для лугов и минимальна для хвойных лесов, летом приращение внутренней энергии обратно пропорционально эксергии (рис. 1) и ее величина максимальна на болотах.

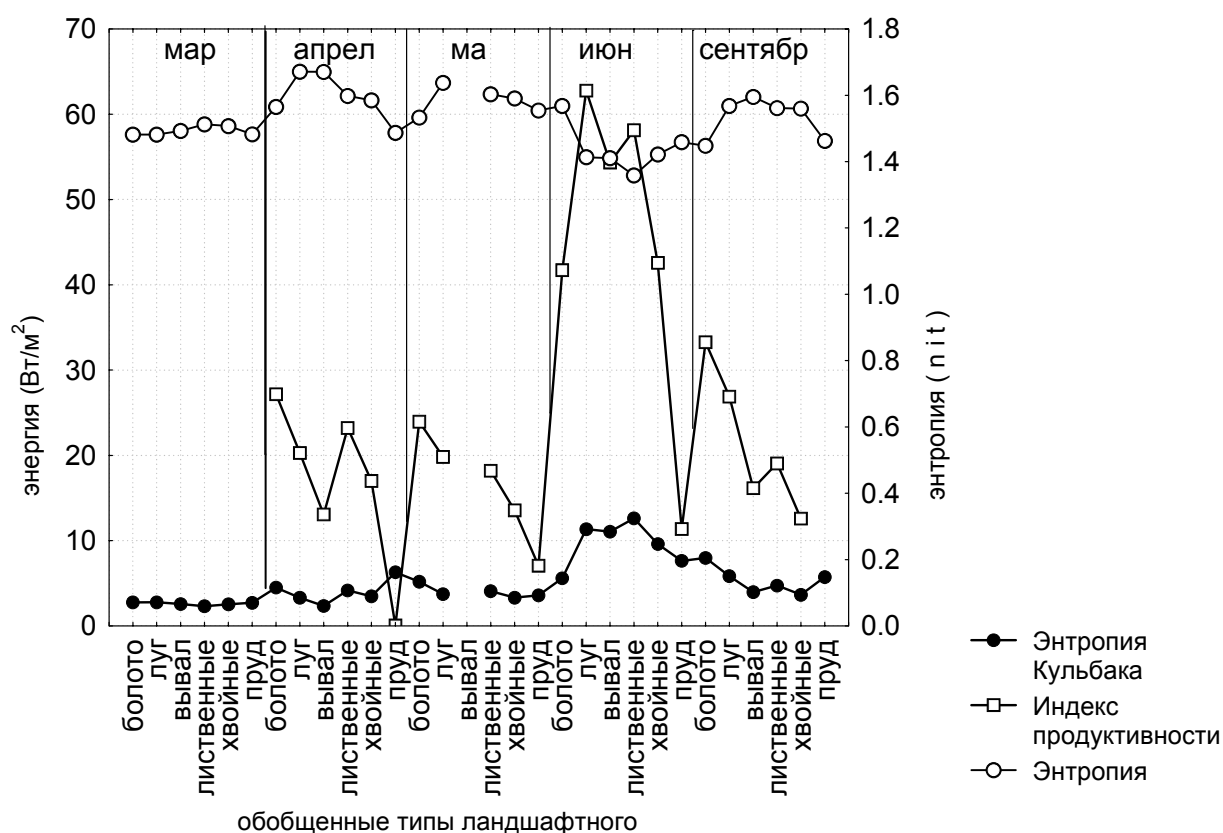


Рис. 2. Пространственно-временное варьирование неравновесности по энтропии Кульбака, энтропии отраженной солнечной энергии и индекса продуктивности

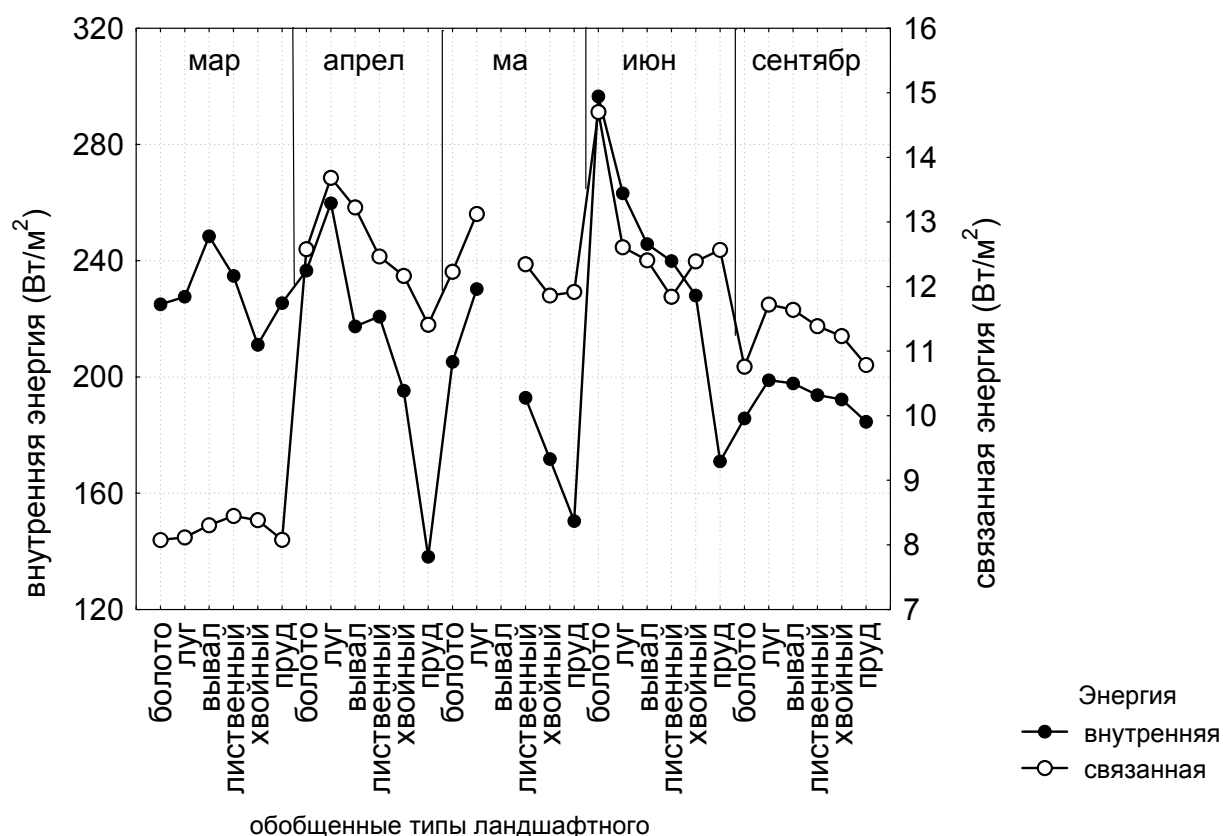


Рис. 3. Пространственно-временное варьирование связанной и внутренней энергии

Проведенный анализ пространственно-временного варьирования энергетических характеристик для территории заповедника и его охранный зоны позволил выявить основные особенности преобразования солнечной энергии различными типами ландшафтного покрова:

1. В целом для рассматриваемого ландшафта преобразование энергии принципиально различается для периода с наличием снежного покрова и вегетационного периода. В конце зимы (март) преобразование энергии максимально близко к равновесному, энергия в системе расходуется на чисто физические процессы, и, соответственно, тепловой поток определяется теплоемкостью деятельной поверхности. В вегетационный период преобразование энергии направлено на максимизацию круговорота влаги и производство биологической продукции, связанное с неравновесностью преобразования солнечной радиации растительным покровом. В целом для территории эксергия и неравновесность максимальны летом (июнь), тогда же наблюдаются максимальное производство продукции и транспирация. Весной и осенью наблюдается переходная ситуация с низкой неравновесностью.

2. Сезонное варьирование термодинамических переменных в разных типах ландшафтного покрова в целом сходно и отличается лишь величиной эксергии и поглощенной радиации: хвойные леса, поглощают максимальное количество солнечной энергии и имеют максимальные затраты энергии на испарение при минимальной неравновесности, продукции и тепловом потоке. Лиственные леса и вывалы имеют существенно меньшие затраты на испарение при большей продуктивности и тепловом потоке, минимальны затраты на испарение у лугов и сельскохозяйственных земель при максимальных продукции и тепловом потоке. Принципиально отличается сезонное варьирование энергетических характеристик на верховых болотах. Летом верховые болота затрачивают в сравнении с лесными и луговыми комплексами минимум энергии на испарение и биологическую продуктивность и они наиболее равновесны, максимальные неравновесность и продуктивность у болот в переходные периоды, при чем, в целом для

вегетационного периода их неравновесность сохраняется примерно на одном уровне, с максимумом осенью.

Единство механизмов преобразования солнечной энергии позволяет предположить наличие достаточно сильно действующего общего фактора, который можно определить как инвариант ее преобразования. Оценка инвариантности различных составляющих энергетического баланса дает возможность выделить типы с различными стратегиями использования солнечной энергии и механизмами саморегуляции. Временной инвариант энергетических характеристик для территории был оценен на основе определителя (линейные отношения) и коэффициента конкордации Кендалла (не чувствительна к нелинейности отношений) для вегетационного периода (преобразование энергии ландшафтом в период с разрушающимся снежным покровом – март – принципиально отлично и требует отдельного рассмотрения). Первый фактор метода главных компонент отображает пространственное варьирование вневременного инварианта. Локальная оценка его выраженности была получена через сумму квадратов отклонений от инварианта энергетической характеристики за каждый сезон. Для основных типов ландшафтного покрова заповедника оценена степень пространственного варьирования инварианта.

В целом для исследуемой территории наиболее высока инвариантность поглощения солнечной энергии, теплового потока: поглощение на 84%, а тепловой поток на 71% описываются одним фактором. Таким образом, можно утверждать, что работа всей системы в целом направлена на поддержание максимального поглощения энергии и соответственно, теплового поля. Для эксергии, в целом, инвариантность несколько ниже – нагрузка на первый фактор 53%, что связано с нелинейностью изменения поля эксергии в сентябре по отношению к весне и лету, для которых эксергия максимально инварианта, это позволяет предполагать, что целевой функцией системы является в первую очередь поддержание эксергии. Следующий уровень инвариантности имеет вегетационный индекс. Внутренняя энергия, в общем, довольно инварианта, но для ландшафта в целом ее изменения в пространстве существенно нелинейны. Минимальную инвариантность имеют общая энтропия отраженной энергии и энтропия Кульбака – в различные сезоны их пространственное распределение сильно варьирует, таким образом, эти характеристики играют роль регулятора – варьирование их изменения обеспечивает сохранение инварианта поглощенной энергии, эксергии и теплового поля (принцип необходимого разнообразия (Эшби, 1959), что подтверждается результатами анализа пространственного варьирования инвариантности.

Типы ландшафтного покрова, образующие потенциальный сукцессонный ряд от лугов к хвойным лесам, формируют такой же ряд по инвариантности эксергии: луга наименее, хвойные леса наиболее инвариантны. Поглощенная радиация и тепловой поток на вывалах более инвариантны, чем в лиственных лесах (рассеивание тепла сухими деревьями). Для болот температура и эксергия не являются инвариантами – отклонения для них максимальны.

На рис. 4а показаны средние значения поглощенной энергии, рассчитанные по регрессионной модели от первого фактора, полученного методом главных компонент, а на рис. 4б средние значения отклонений без учета знака. По условию экосистема тем лучше регулирует переменные, чем меньше величина этих отклонений. Оценка отклонений от инварианта основных энергетических характеристик показывает, что наименьшей саморегуляцией обладают антропогенные объекты: дороги, редкие пашни, в меньшей степени свежие вырубки.

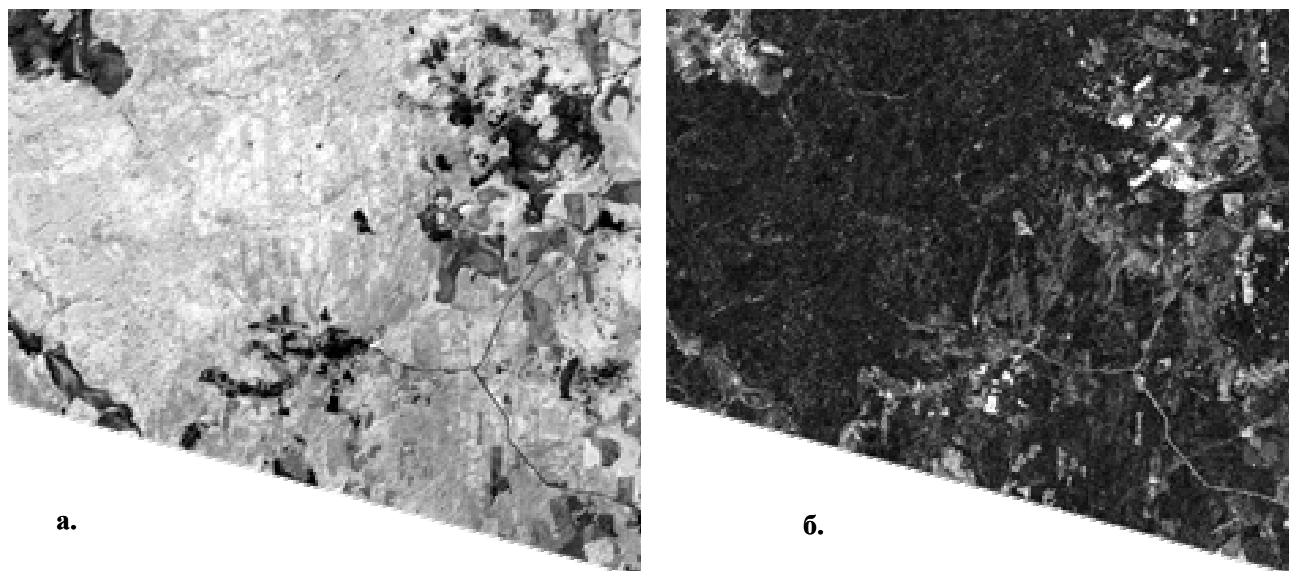
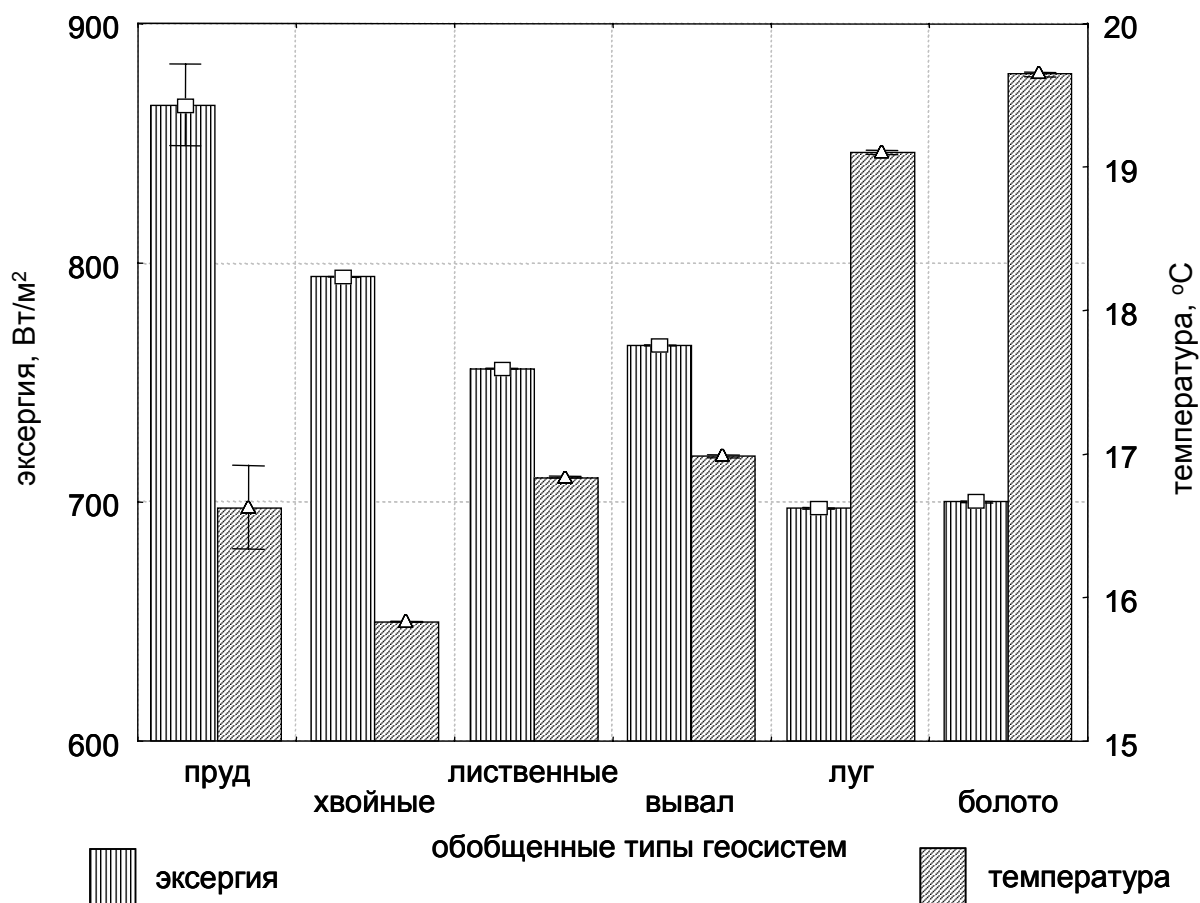


Рис. 4. Инвариант (а.) и отклонения от инварианта (б.) для поглощенной солнечной энергии (контрастированное изображение).

Светлый тон – большие значения, темный – малые

По среднему значению инварианта для типа ландшафтного покрова оценен масштаб регулирования теплового потока за счет затрат энергии на испарение, практически пропорционального эксергии в вегетационный период. На рис. 5 показаны средние значения инвариантов для эксергии и температуры для обобщенных типов. Из графика следует, что хвойный лес по отношению к мелколиственному понижает температуру на один градус, по отношению к вывалам почти на два, а по отношению к безлесным пространствам на четыре градуса; верховые болота теплее хвойного леса в среднем на 4°C.





Измеренные в поле свойства ландшафтного покрова описывают варьирование инварианта эксергии на 40%, теплового потока на 25%: саморегуляция определяется, в основном, долей участия хвойных пород в древостое, возрастом и запасом леса (увеличение регуляции), проективным покрытием травостоя и мхов (уменьшение). Варьирование свойств рельефа определяет 10% варьирования инварианта эксергии и 13% теплового потока.

Таким образом, при анализе инвариантов основных энергетических характеристик их отклонений выявлены энергетические переменные с минимальным временным варьированием, и поддержание которых, соответственно, можно определить как целевую функцию преобразования энергии экосистемами: в общем, для исследуемой территории это поглощенная энергия, тепловой поток и эксергия. Установлено, что способность к саморегуляции основных инвариантов образует закономерный ряд, повторяющий сукцессионный: «луга – вывалы – лиственные леса – хвойные леса»; наименьшей саморегуляцией обладают антропогенные объекты. Для лесной растительности наибольшую инвариантность обеспечивают высокое участие ели в древостое, увеличение запаса и возраста древостоя.

Полученные оценки свидетельствуют о том, что для верховых болот наиболее инвариантны внутренняя и связанная энергии, тепловой поток и биологическая продукция, соответственно, болота в отличие от лесов, осуществляющих транспорт влаги из почвы в атмосферу, удерживают высокий прогрев территории и консервируют атмосферные осадки в подземном стоке, сохраняя при этом уровень биологической продукции, сопоставимый с лесами. Стоит также отметить, что верховые болота принципиально отличаются от суходольных экосистем по режиму функционирования – максимальная активность производства биологической продукции и влагообмена с атмосферой наблюдается у болот в весенний и осенний периоды.

В результате исследований оценена климаторегулирующая роль лесной растительности: отсутствие леса повышает температуру деятельной поверхности в среднем на 4°C. Если эти соотношения устойчивы в широком диапазоне географических условий лесной зоны, то можно представить вклад естественных процессов развития верховых болот и антропогенного сведения лесов в температуру приземного слоя атмосферы.

#### Литература

1. Эшби У. Р. Введение в кибернетику, М, Изд-во иностранной литературы, 1959, 432 с.
2. Jorgensen S. E., Svirezhev Y. M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Elsevier Ltd. The Boulevard, Oxford UK, 2004, 369 p.
3. Landsat 7 Science Data Users Handbook, <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov>