

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РОЛЬ РЕЛЬЕФА В ФОРМИРОВАНИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ КАРСТОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

© 2012 г. В. В. Елсаков, Л. В. Тетерюк

Учреждение Российской академии наук Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 18.02.2011 г.

Проведены комплексные исследования характеристик фитоценозов на участках известняковых обнажений бассейна р. Сойва с привлечением материалов разновременной съемки спутников Landsat и Aster (цифровая модель рельефа), методов ГИС-моделирования, полевых геоботанических наблюдений и данных температурных датчиков. Приуроченность сообществ к различным экспозициям и склоновым поверхностям была основной причиной различий, связанных с температурным режимом, сезонным развитием надземной фитомассы, продолжительностью периода вегетации растений, формированием видового состава фитоценозов. На территориально сопряженных участках различия значений NDVI и температуры поверхности максимальны на изображениях, полученных в начале и конце вегетационного периода, для сообществ, расположенных в пределах крайних членов ряда склоновых поверхностей полярных экспозиций. Данные различия проявляются в меньшей степени на изображениях середины вегетационного периода. Присутствие видов неморальных и тундровых флористических комплексов на смежных участках позволяет оценить данные различия по уровню проявления с зональными.

Ключевые слова: карстовые ландшафты, спутниковый мониторинг, разноориентированные склоновые поверхности, флористическое биоразнообразие, известняки

ВВЕДЕНИЕ

Материалы спутниковых съемок в настоящее время выступают в качестве важных информационных источников, используемых для характеристики пространственно-временных закономерностей распределения структурно-функциональных параметров природных экосистем, основанных на топологическом подходе. Преимущества их использования определяются прежде всего возможностью получения картографических материалов, представляющих собой “емкую графическую форму информации о репрезентативном участке исследуемой территории” (Сочава, 1978). Существенное влияние на формирование характеристик растительного покрова умеренных широт играет мезорельеф. На территориях с высокой континентальностью климата, ограниченных параллелями 50°–70° с.ш., проявления различий в величинах инсоляции крутых южных и северных склонов прямой солнечной радиацией максимальны (до 3 раз) (Щербаков, 1970; Holland, Stein, 1975). Данные особенности принимают во внимание при оценке роли рельефа в распределении биологического разнообразия разных уровней. Так, согласно правилу предварения (Алехин, 1951), ориентация и наклон склоновых поверхностей определяют контрастность экологических условий, что проявляется в распределении экс-

тразональных типов растительности, т.е. является предпосылкой для формирования северных и более южных зональных типов фитоценозов в пределах территориально смежных участков. Развитие современных инструментальных методов исследований, технологий спутникового мониторинга, позволяющих проводить измерение количественных и качественных показателей компонентов экосистем, существенно расширили возможности для выполнения оценки роли пространственного фактора (мезо- и микрорельефа) в формировании экологических градиентов.

Особое положение в таежной зоне применительно к вопросам формирования биологического разнообразия европейского северо-востока России (ЕСВР) занимают выходы кальцийсодержащих пород в речных долинах. Помимо перераспределения тепла наклонными поверхностями и создания разнообразных контрастных экологических условий, на участках выходов этих пород снимаются основные зональные факторы таежной зоны, лимитирующие рост и развитие многих видов растений: недостаток тепла и высокую кислотность почв. Известно, что богатство горных пород подвижным Ca^{2+} обуславливает резкие отличия кальциевых ландшафтов от типичных таежных, их почвы имеют нейтральную, слабощелочную и даже щелочную реакцию верхних горизон-

тов и высокое содержание гумуса (Перельман, Касимов, 1999). Выходы кальцийсодержащих пород в пределах территории ЕСВР с хорошо сохранившимся реликтовым скальным флористическим комплексом (Юдин, 1963), множеством охраняемых видов сосудистых растений, мохообразных и лишайников включены в систему особо охраняемых природных территорий Республики Коми (Кадастр охраняемых природных..., 2003, 2005), Архангельской области (Структура и динамика... 2000; Компоненты экосистем..., 2008). Среди наиболее существенных факторов, определяющих существование этого комплекса, Ю.П. Юдин (1963) отмечал следующие: скорость, характер и формы эродирования известняков; пониженную конкуренцию между растениями, связанную с подвижностью субстрата; микроклимат известняков. В ряде работ, посвященных последнему, основное внимание уделялось решению вопроса о влиянии тепловых свойств известняковых субстратов на микроклимат, в других была выявлена ведущая роль рельефа (Коржинский, 1889; Kraus, 1911; Келлер, 1914; Комаров, 1933; Васильев, 1939; Пономарев, 1940).

Цель работы состоит в анализе возможностей использования материалов спутникового мониторинга в комплексе с традиционными экологическими и геоботаническими методами исследований для изучения предпосылок и особенностей формирования показателей биоразнообразия карстовых ландшафтов модельной территории ЕСВР в условиях контрастных экологических градиентов.

Среди поставленных задач выделены: 1) выполнение тематического картирования орографических и ландшафтных особенностей модельного участка, выделение доминирующих классов фитоценозов и изучение их пространственной приуроченности по материалам спутниковых изображений; 2) геоботанические и флористические полевые исследования, оценка специфичности сезонных изменений температурного режима в серии элементарных ландшафтов территории инструментальными методами; 3) выявление особенностей изменений спектральных и температурных показателей выделенных групп фитоценозов в течение вегетационного периода по материалам съемки Landsat; 4) анализ роли форм мезорельефа, экспозиции и морфологии склонов в перераспределении температуры на поверхности; 5) оценка разнообразия выделенных групп экологических условий как предпосылки для формирования редких флористических комплексов на известняках Тимана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве модельного участка выбраны выходы известняков Южного Тимана в условиях верх-

него и среднего течения р. Сойва (приток р. Печора) на участке 48 км от устья (62°44.3' с.ш., 55°53.2' в.д.) с богатым и хорошо сохранившимся реликтовым скальным флористическим комплексом (Юдин, 1963; Ботанический заказник..., 2006; Роль известняков Тимана..., 2006) (рис. 1). Долина реки имеет V-образную форму поперечного сечения, глубина вреза достигает 30–50 м. Мониторинговый участок включал в себя территорию площадью 400 км² (20 × 20 км). Особенности рельефа территории проанализированы на основании анализа цифровой модели местности (ЦМР), полученной по данным стереопар спутника Aster и топографическим картам. Сравнительный анализ высот поверхности Земли по данным ЦМР и топографическим материалам (М 1 : 50000) выявил между ними значимую линейную корреляцию ($y = 0.69x + 42.1$; $r = 0.92$). Данные съемки спутника Landsat получены для дат 23.05.2005 (L7), 18.6.1988 (L5), 19.07.1999 (L7), 30.07.1992 (L5), 17.9.2001 (L7) и 8.11.1999 (L7) (табл. 1). Интервал времени съемки варьировал с 11:00 до 11:30 локального времени. Для всех изображений проведена пространственная и радиометрическая калибровка, топографическая коррекция S-методом (Teillet et al., 1982). Вычисления величин абсолютных температур поверхности (°C) выполнено по значениям яркостных характеристик шестого канала (Chander, Markham, 2003), расчет нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) – по четвертому и третьему каналам в соответствии с общепринятой методикой. Даты съемки были приурочены к месяцам разных лет, имеющим различия по погодным показателям (табл. 2). Рассматривая усредненные величины водного (осадки) и температурного режимов для месяцев съемки данных лет видны различия, характеризующие их проявление как не связанные между собой. В большинстве случаев величины отклонений усредненных характеристик температурных показателей для периодов съемки не превышали 16.7%, за исключением мая 2005 г., когда месяц был более теплым (температура выше средних величин на 82.3%) и менее влажным (на 35.5%), чем средние значения по рассмотренным годам. Поэтому по проявлению фенологических показателей изображения могут быть рассмотрены в зависимости от сезона съемки в виде временного ряда.

Сравнительный анализ изображений без и прошедших топографическую коррекцию показал, что минимальные различия в значениях индекса NDVI отмечены для сцен с большими значениями высоты солнца относительно горизонта (18.06.1988). Данная сцена была принята в качестве основы при выполнении управляемой классификации растительного покрова с выделением доминирующих групп фитоценозов. Наиболее существенные различия, полученные для одного

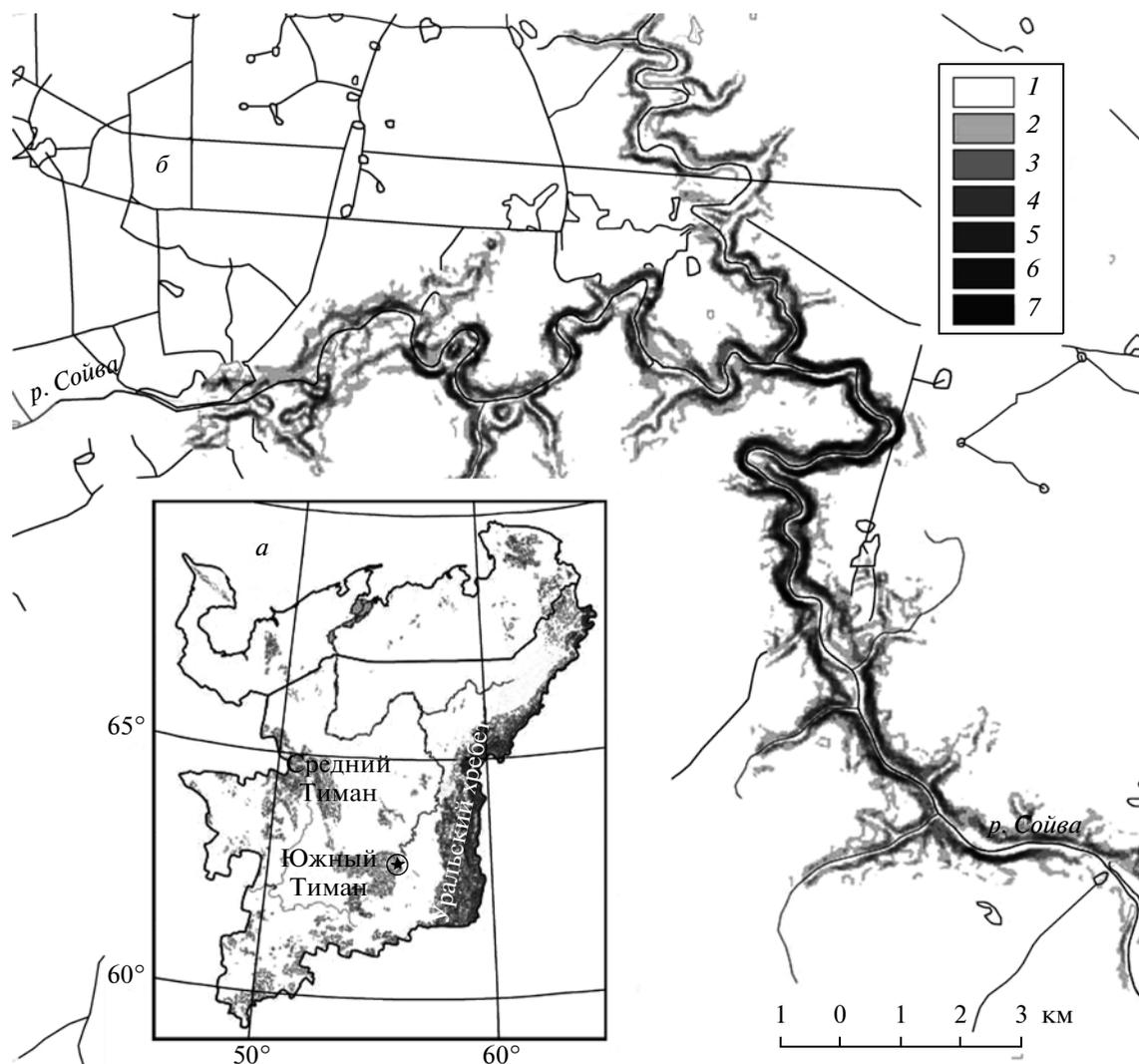


Рис. 1. *a* – Локализация участка проведения работ в пределах территории Европейского Севера; *б* – представленность разных градаций склоновых поверхностей на модельном участке: 1 – $< 5^\circ$, 2 – $5^\circ\text{--}10^\circ$, 3 – $10^\circ\text{--}15^\circ$, 4 – $15^\circ\text{--}20^\circ$, 5 – $20^\circ\text{--}25^\circ$, 6 – $25^\circ\text{--}30^\circ$, 7 – $>30^\circ$.

класса сообществ, установлены между значениями NDVI для участков северных и южных экспозиций с уклоном более 20° на изображениях начала и окончания вегетации. Для проверки достоверности классификации привлекались планы лесоустройства Нижне-Омринского лесничества Республики Коми (1994, М 1 : 50000). В период 2004–2008 гг. на территории модельного участка выполнены полевые исследования с проведением почвенных, геоботанических и флористических наблюдений. При верификации полученных тематических геоботанических материалов через модельные склоны заложен трансект, на котором были выполнены геоботанические описания в границах выделенных сообществ методом регулярного отбора (Осипов, 2002).

Изображение Landsat-TM зимнего периода (08.11.1999) было привлечено для расчета показателя

сомкнутости крон древостоев модельного участка методом декомпозиции спектральных смесей (метод SMA, Spectral Mixed Analysis), исходя из положения, что доля оцениваемых компонент пропорциональна их площади в проекции на земную поверхность (Барталев и др., 2009). В качестве “чистых компонент” использовали ранее полученные параметры (Елсаков, Марущак, 2010), полученные для открытых пологих заснеженных участков (сомкнутость крон равна 0), и характеристики участков с максимально сомкнутым древостоем (сомкнутостью крон 0.9–0.95). Достоверность выявления показателей сомкнутости возрастает при использовании зимних изображений, что, с одной стороны, связано с маскированием многих форм микрорельефа земной поверхности снежным покровом (Алексеев, Сваткова, 2008), с другой, – с отсутствием листвы

Таблица 1. Характеристика использованных материалов космической съемки

№	Положение траектории	Дата съемки	Сенсор	Азимут солнца	Высота солнца в момент съемки	Высота солнца в полдень
1	170_16	23.05.2005	ETM+	162.0	47.0	47.50
2	169_16	18.06.1988	TM	154.8	48.9	50.62
4	То же	19.07.1999	ETM+	160.6	46.9	48.13
5	170_16	30.07.1992	TM	151.0	43.0	45.65
6	То же	17.09.2001	ETM+	165.9	28.7	29.43
7	169_16	08.11.1999	То же	171.8	10.4	10.88

Таблица 2. Климатические особенности района проведения работ по данным метеостанции Троицко-Печорска*

Климатические показатели	1988 г.	1992 г.	1999 г.	2001 г.	2005 г.	Среднее за период
Температурные показатели, °C						
Май	<u>159.0(-14.5)</u> 5.3(-14.5)	<u>174.0(-6.5)</u> 5.8(-6.5)	<u>46.0(-75.3)</u> 5.8(-6.5)	<u>212.0(14.0)</u> 7.1(14.5)	<u>339.0(82.3)</u> 11.3(82.3)	<u>186.0</u> 6.2
Июнь	<u>429.0(14.5)</u> 14.3(14.5)	<u>294.5(-21.4)</u> 9.89(-21.3)	<u>386.6(3.2)</u> 12.9(3.3)	<u>387.2(3.3)</u> 12.9(3.3)	<u>376.0(0.4)</u> 12.5(0.1)	<u>374.3</u> 12.5
Июль	<u>603.0(18.8)</u> 20.1(20.9)	<u>423.1(-16.7)</u> 13.6(-18.2)	<u>502.0(-1.1)</u> 16.2(-2.5)	<u>491.8(-3.1)</u> 15.9(-4.3)	<u>519.0(2.2)</u> 17.3(4.1)	<u>507.8</u> 16.6
Август	<u>416.0(6.0)</u> 13.9(8.3)	<u>345.5(-12.0)</u> 11.1(-13.6)	<u>366.0(-6.7)</u> 11.8(-8.1)	<u>393.9(0.4)</u> 12.7(-1.1)	<u>441.0(12.4)</u> 14.7(14.5)	<u>392.5</u> 12.8
Сентябрь	<u>187.0(-23.1)</u> 6.2(-21.8)	<u>278.7(14.6)</u> 8.93(12.6)	<u>195.6(-19.6)</u> 6.36(-19.8)	<u>280.6(15.4)</u> 9.05(14.2)	<u>274(12.7)</u> 9.1(14.8)	<u>243.2</u> 7.9
Среднемесячная сумма осадков, мм						
Май	30.0(-46.2)	49.0(-12.2)	81.0(45.2)	83.0(48.7)	36.0(-35.5)	55.8
Июнь	47.0(-8.1)	39.2(-23.3)	80.0(56.4)	44.5(-13.0)	45.0(-12.0)	51.1
Июль	44.0(-22.6)	76.0(33.7)	71.7(26.1)	72.5(27.6)	20.0(-64.8)	56.8
Август	30.0(-58.9)	106.7(46.2)	35.2(-51.8)	105.0(43.9)	88.0(20.6)	73.0
Сентябрь	85.0(41.0)	35.0(-42.0)	98.4(63.2)	36.1(-40.1)	47.0(-22.1)	60.3

Примечание. *В числителе сумма среднесуточных температур воздуха (°C), в знаменателе – среднемесячная температура воздуха (°C), в скобках приведены величины отклонений от средних за период наблюдений (в % от средних за период наблюдений). Выделены величины для периодов, в которые выполнена съемка. По: Агроклиматический бюллетень по РК за период 1988–2005 гг. Сыктывкар: Росгидромет, 1988–2005. С. 6.

и погребением лишайниково-мохового, травяно-кустарничкового и частично кустарничкового яруса, что приводит к большей контрастности исследуемых компонент. Общий принцип оценки вклада долей отдельных компонент для линейного смешивания спектров проводили согласно выражения:

$$DN_c = \sum_{i=1}^n F_i DN_{i,c} + E_c, \quad (1)$$

учитывая следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1, 0 \leq F_i \leq 1, \quad (2)$$

где DN_c – числовое выражение значения пиксела в канале c ; F_i – доля i -го эталона в смеси; $DN_{i,c}$ – числовое выражение значений i -го эталона в смеси в канале c ; n – количество эталонов; E_c – ошибка оценки для канала c .

Среди возможных ограничений использованного метода отметим возможность влияния на результаты анализа присутствие снега в кронах деревьев и примесь лиственных пород, сомкнутость крон которых существенно меняется в зависимости от сезона наблюдений. Однако выполненная ранее калибровка построенной модели и оценка ее точности по сходимости полученных величин и полевых пространственно привязанных дан-

Таблица 3. Соотношение площадей (%) разных групп склонов по данным ЦМР Aster

Крутизна склонов	Экспозиция склонов поверхности								ВСЕГО:
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
5°–10°	1.89	1.78	1.19	2.04	2.12	2.16	1.50	1.94	14.6
10°–15°	5.78	6.18	4.39	6.23	6.83	6.85	4.69	5.62	46.6
15°–20°	2.64	3.02	2.45	2.10	2.90	3.36	2.42	2.20	21.1
20°–25°	1.25	1.59	0.93	0.77	1.13	1.46	1.29	0.89	9.3
25°–30°	0.91	0.73	0.35	0.33	0.64	0.79	0.85	0.50	5.1
30°–35°	0.51	0.44	0.16	0.07	0.28	0.21	0.32	0.29	2.3
>35°	0.31	0.37	0.05	–	0.05	0.02	0.06	0.22	1.1
Всего	13.3	14.1	9.5	11.5	13.9	14.8	11.1	11.6	100.0

ных, зафиксированных с использованием фото-графической камеры Canon EOS-60D и объектива “Fish-eye” (Елсаков, Марушак, 2011), показала, что между показателями в целом наблюдается значимая положительная коррелятивная связь, описываемая линейной функцией.

Для верификации полученных результатов, характеризующих влияние морфологии склона и его экспозиции на температурный режим инструментальными подспутниковыми методами, были выбраны участки, сходные по литологии и морфологии склонов (длина, крутизна, строение профиля), расположенные на полярных склонах: по азимуту 337.5° (далее – “С”) и 217.5° (далее – “Ю”), с крутизной склона 30°–35°, в 0.5 км друг от друга. Измерения проводили в период с 20 мая по 20 сентября 2004 г. с помощью температурных датчиков-логгеров (DS1921G, точность 0.5°C, интервал измерений 1.5 ч), установленных на уровне земной поверхности в моховой подушке.

Все элементы изображения ЦМР участка были объединены в группы и составили семь классов по величинам крутизны склонов с интервалом в 5° и восемь классов по экспозиции склонов, соответствующих сторонам света (интервал шага в 45°) (табл. 3). В связи с тем, что сообщества реликтового комплекса приурочены к склоновым поверхностям, рассматривали участки, имеющие угол крутизны склонов более 5°. Для выделенных комбинаций классов отдельных растительных сообществ (55 сочетаний) рассчитаны средние значения и доверительные интервалы ($P = 0.95$) показателей температуры и индекса NDVI для разных элементов изображений. Расчеты дневного и суточного хода поступления прямой солнечной радиации (Q_s) выполнены по методике К.Я. Кондратьева (Кондратьев и др., 1978).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение доминирующих групп растительных сообществ

Анализ ЦМР всего участка исследований показал, что большая часть района представлена выложенными поверхностями (уклон менее 5°). Площадь участков с уклоном, превышающим 5°, составила 16.7 км² (4.2% рассмотренной территории) (рис. 1), в основном это были эродированные склоны долины р. Сойва. Характерной особенностью территории является доминирование в группе склоновых участков поверхностей с крутизной 10°–15° (46.6%) и 15°–20° (21.1%) (табл. 3). Небольшую площадь (менее 3.3%) занимают поверхности с уклоном выше 30°. Однако данные поверхности преимущественно связаны с обнажениями известняков в долине реки. Различия в представленности склонов по экспозиции выражены в меньшей степени, наибольшая площадь склонов приходится на поверхности юго-западной (14.8%), наименьшая – восточной (9.5%) экспозиции.

Использование изображений Landsat и полевых материалов позволило методами управляемой классификации выделить в пределах склоновых участков территории шесть доминирующих групп растительных сообществ. Анализ представленности выделенных классов на элементах поверхностей был выполнен путем совмещения обработанного изображения и ЦМР. В распределении фитоценозов отмечена приуроченность к склонам различной экспозиции (рис. 2): лиственные (травяно-зеленомошные и кустарничково-зеленомошные) расположены на наиболее крутых склоновых поверхностях (25°–35°), преимущественно на склонах северной, северо-восточной и северо-западной ориентации. На участках с близким залеганием материнских пород доля лиственных сообществ увеличивается. На склонах с меньшим уклоном и более разви-

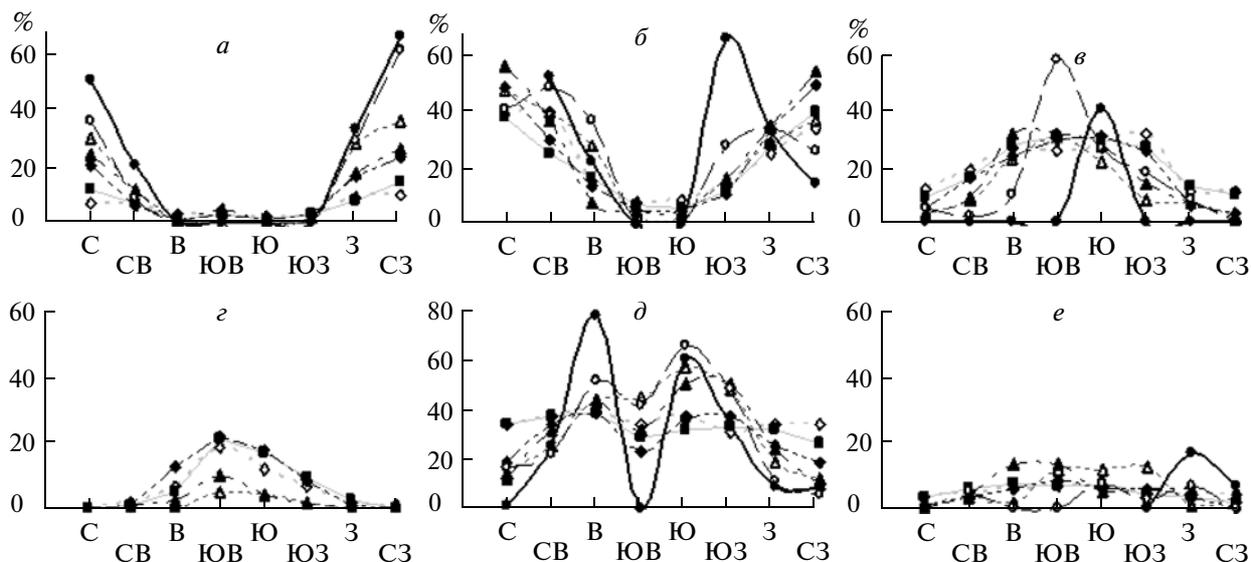


Рис. 2. Встречаемость доминирующих классов растительности на участках поверхностей различных уклонов и экспозиции (%): *а* – лиственный, *б* – ельник, *в* – лиственные леса, *г* – луговая растительность, *д* – смешанный ельник, *е* – сосняк. Цифрами обозначены участки наклонных поверхностей в градусах: 1 – от 5° до 10°, 2 – от 10° до 15°, 3 – от 15° до 20°, 4 – от 20° до 25°, 5 – от 25° до 30°, 6 – от 30° до 35°, 7 – более 35°.

тым почвенным покровом доминируют ельники травяно- и кустарничково-зеленомошные. Занимаемые ими поверхности относятся преимущественно к склонам восточной, западной, северо-восточной и северной экспозиции. На участках юго-восточной (до 60% на склонах с уклоном 30°–35°), южной (до 40% для склонов более 35°) и юго-западной экспозиций достаточно хорошо представлены более теплолюбивые березовые травяные и травяно-зеленомошные леса. В данную группу вошли и производные мелколиственные сообщества, возможно, сменившие высокопроизводительные еловые, сосновые и лиственный древостои на склонах южных экспозиций, затронутые хозяйственной деятельностью.

Переходным классом между мелколиственными ценозами и ельниками были смешанные травяно-зеленомошные березово-еловые леса. Данная, наиболее многочисленная, группа фитоценозов расположена преимущественно на восточных, южных и юго-западных склоновых поверхностях. Немногочисленные классы луговой растительности занимали склоны южных экспозиций с незначительным уклоном (до 15°–20°). Группа сосняков травяно- и кустарничково-зеленомошных не имела ярко выраженной пространственной приуроченности, однако склоны северной ориентации лимитировали развитие данного класса.

Для элементов изображений участков лесных фитоценозов методом SMA-анализа были рассчитаны показатели сомкнутости крон. В распределении показателя не было выявлено выраженных

различий между склонами различной экспозиции. Однако с ростом уклона поверхности сомкнутость древостоев снижалась (рис. 3). Лесные фитоценозы занимали склоновые участки с уклоном не выше 25° – на них формировались разреженные древостои и редколесья (показатель сомкнутости ниже 30%). Выположенные участки (уклон менее 5°) характеризовались доминированием фитоценозов с показателем сомкнутости 60–70%.

Полевые исследования участка показали, что в пределах рассмотренных трансект модельных склонов доминируют дерново-карбонатные маломощные щебнистые слабощелочные рН 6.5–8.0 почвы с хорошо развитым гумусовым горизонтом. Различия в микроклимате разноориентированных склонов слабо выражены в почвенном профиле и проявляются главным образом в биологической активности почв – составе и численности бактериальной и грибной флоры (Виноградова, 2007).

Изменение температуры подстилающей поверхности по спутниковым данным

Наиболее важными факторами, влияющими на формирование теплового баланса растительных сообществ, являются сезон/период и время наблюдений в течение суток, пространственное положение сообществ, их приуроченность к разным формам мезо- и макрорельефа, ярусная структура и состав древостоя фитоценоза, особенности почвенного состава, глубина залегания поверхностных вод и др. Интегрирующая роль

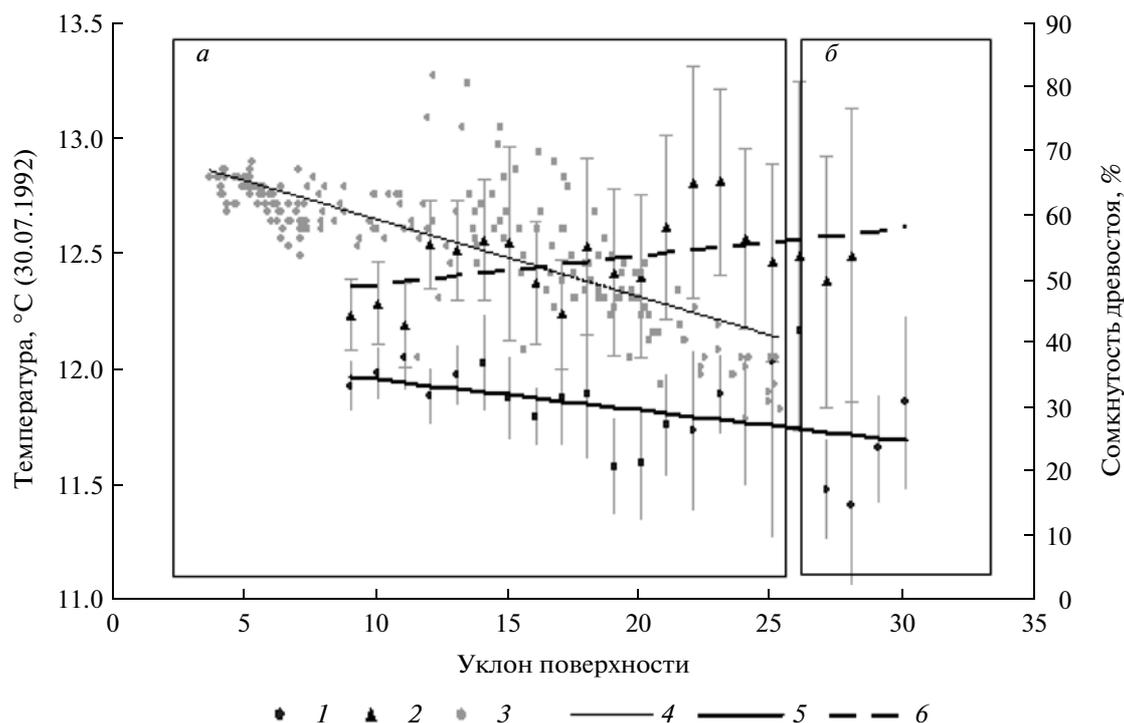


Рис. 3. Влияние уклона поверхности и сомкнутости древостоя на формирование различных температурного режима участков северных и южных экспозиций: *a* – участки с древесной растительностью, *б* – участки реликтового скального флористического комплекса. Цифрами обозначены: показатели температуры склонов: 1 – северной и 2 – южной экспозиций, 3 – величины сомкнутости крон древесных пород, 4 – линия тренда показателя сомкнутости крон ($y = -1.21x + 71.6$, $r^2 = 0.59$, $n = 208$), 5 – линии тренда показателя температуры склонов северной ($y = -0.01x + 12.1$, $r^2 = 0.2$, $n = 774$) и 6 – южной ($y = 0.015x + 12.2$, $r^2 = 0.28$, $n = 797$) экспозиций.

температурного показателя позволяет рассматривать построенные изотермы для выявления границ, площадей и положения отдельных биоценозов. По значениям среднесуточных температур воздуха района исследований, июль является наиболее теплым летним месяцем (средняя температура 16.6°C), однако для широты района суммарная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в течение вегетационного периода, достигает максимальных значений 864 МДж/м^2 в июне (средняя температура месяца за годы съемок 12.5°C) и снижается к июлю до 855 МДж/м^2 (на 1.0%), до 641 МДж/м^2 к августу (на 25.8%, $t_{\text{cp}} = 12.8^{\circ}\text{C}$) и до 400 МДж/м^2 к сентябрю (на 53.7%, $t_{\text{cp}} = 7.9^{\circ}\text{C}$) (СНиП 23-01-99).

Для большинства выделенных растительных сообществ наиболее стабильные значения температуры на модельном участке отмечены для поверхностей с уклоном менее 10° , в силу сглаживания микроклиматических условий древесным ярусом (рис. 3). Последний значительно трансформирует микроклиматические условия в почвенном слое, создавая определенный режим внутри растительного полога – фитоклимат (Галенко, 1983). Под пологом леса радиационные различия разноориентированных поверхностей

сокращаются в сравнении с открытыми пространствами, для которых рост уклона поверхности способствует проявлению максимальных различий.

Наибольшие температурные показатели на выделенном участке отмечены на изображениях от 30.07.1992, наименьшие – на снимке от 17.09.2001 (табл. 4). Низкие, статистически значимые значения температуры отмечены для класса лиственничников $8.7 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ (17.09.2001). Еловые древостои характеризовались более высокими значениями температур, чем лиственничные, однако не имели статистически значимых различий. Фитоценозы лугового типа растительности демонстрировали наиболее высокие температуры $17.0 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ (30.07.1992).

Приуроченность рассмотренных растительных сообществ к различным экспозициям и склоновым поверхностям, несмотря на пространственную генерализацию, вызванную разрешением изображения, также демонстрирует влияние на температурные показатели (рис. 4). Более высокие значения температур отмечены для склонов южных экспозиций, низкие – северных, при этом рост различий усиливался с увеличением уклона склоновых поверхностей, дости-

Таблица 4. Средние значения температур подстилающей поверхности для выделенных групп классов, t_{cp} °C

Выделенные классы фитоценозов	Даты съемки*		
	19.7.99	30.7.92	17.9.01
Лиственничник	11.7 ± 0.4	15.5 ± 0.4	8.7 ± 0.6
Ельник	12.0 ± 0.2	15.9 ± 0.2	9.6 ± 0.3
Мелколиственные леса	12.5 ± 0.02	16.3 ± 0.2	11.2 ± 0.3
Луга	13.4 ± 0.9	17.0 ± 0.6	12.6 ± 0.8
Смешанные леса	12.3 ± 0.2	16.2 ± 0.2	10.5 ± 0.2
Сосновые леса	12.7 ± 0.1	16.6 ± 0.6	11.0 ± 0.8

Примечание. *Представлены средние значения и размах доверительного интервала ($P = 0.95$) для выделенных фитоценозов.

гая максимума для крайних членов рассматриваемых рядов.

Вместе с тем важным параметром, заслуживающим внимание при анализе температуры поверхности, является время съемки (для района работ 11:00–11:30 локального времени). В основе различий температуры поверхности разноориентированных склонов лежат режим и продолжительность периода освещенности, что подтверждают построенные модели потока прямой солнечной радиации. Использование методологических подходов, сформулированных К.Я. Кондратьевым (Кондратьев и др., 1978), позволило рассчи-

тать степень варьирования величины поступающей прямой солнечной радиации на склоновые поверхности в пределах модельной территории бассейна р. Сойва (рис. 5). Построенные модели потоков показали, что в летние дни максимальный поток прямой радиации наблюдается на склонах южной экспозиции, к середине дня он увеличивается (на примере 30.07.1992 до 1.0–1.2 кал/(мин см²)). Наиболее высокие значения отмечены на склонах более высокой крутизны. Интенсивность притока солнечной радиации смещена во времени для группы юго-восточных склонов (поступление максимально для склонов

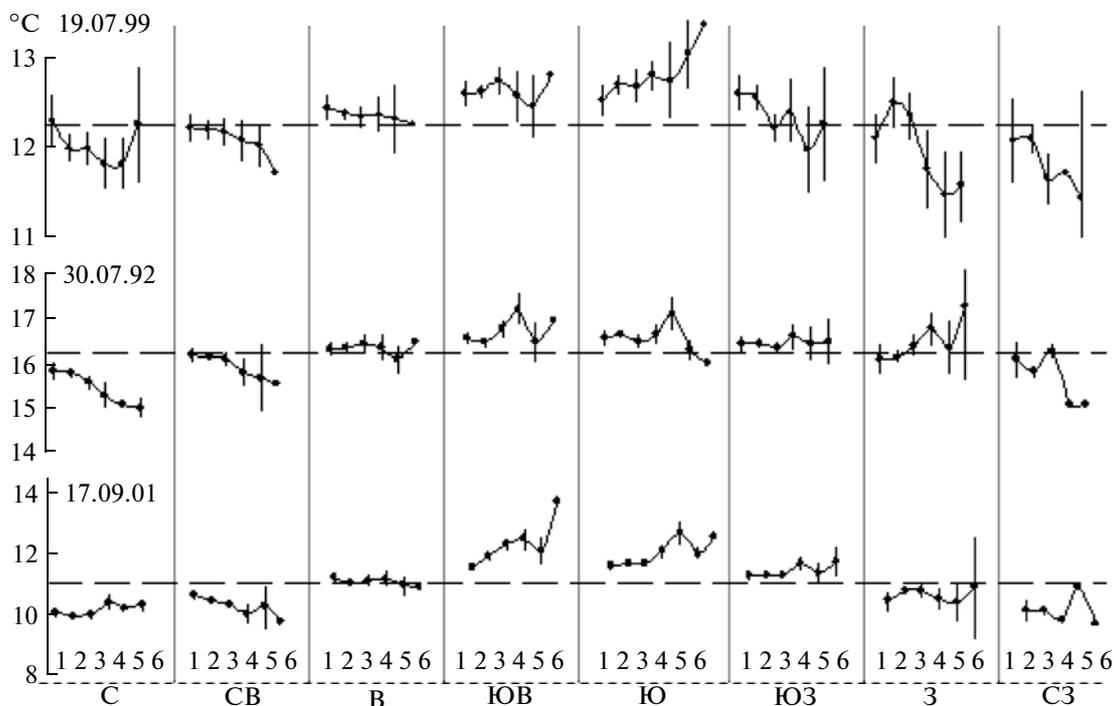


Рис. 4. Вариабельность распределения температур поверхности (°C) на примере зеленомошных лиственных лесов по данным съемки спутника Landsat. Представлены средние значения для выборок и размах доверительного интервала ($P = 0.95$) для склонов различных экспозиций и углов наклона. Пунктиром обозначены средние значения для всего класса. Условные обозначения соответствуют рис. 2 и 3.

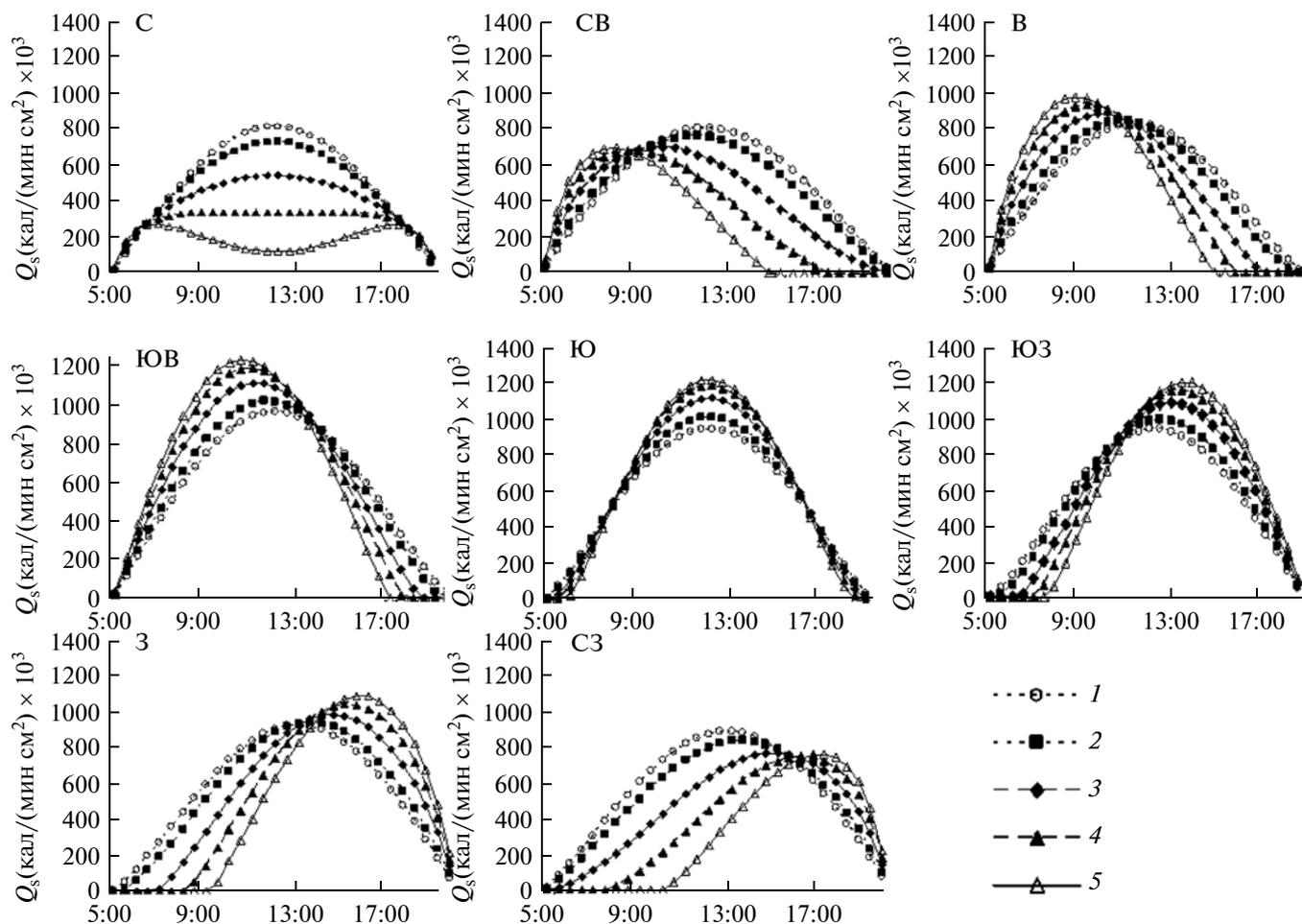


Рис. 5. Особенности притока прямой солнечной радиации для склоновых участков модельной территории разной экспозиции (Q_s кал/(мин см^2)) в течение 30.07.1992. Цифрами обозначены участки наклонных поверхностей в градусах: 1 – 5°, 2 – 10°, 3 – 20°, 4 – 30°, 5 – 40°.

с большим уклоном до полудня) к группе юго-западных (максимальный приток в послеполуденное время), поэтому температура склонов юго-восточной ориентации во время съемки выше. На склонах северной экспозиции картина более сложная. На пологих склонах (5°–20°) поток солнечной энергии также постепенно нарастает к полудню, достигая 0.3–0.8 кал/(мин см^2). На более крутых склонах освещенность максимальна в утренние и вечерние часы (до 0.3 кал/(мин см^2)), а в дневные – снижается, при уклоне более 40° – до 0–0.1 кал/(мин см^2). На склонах восточной и западной экспозиции поток примерно одинаков, меняется лишь его распределение в течение суток.

Температура рассмотренных классов сообществ с разреженным древостоем в целом отражает поступление прямой солнечной радиации на склоновые поверхности (рис. 4). Необходимо отметить, что при одинаковом среднем поступлении радиации на западные и восточные склоны тепловой режим их различен в силу разновремен-

ности поступления максимума радиации. На восточных склонах наибольший приток солнечной радиации наблюдается в первую половину дня, когда много тепла тратится на турбулентный обмен и прогрев почв после ночного охлаждения. Западные склоны максимально инсолируются во вторую половину дня, когда температуры достаточно высоки и расход тепла на турбулентный обмен сокращается. Поскольку западные макросклоны теплее восточных, они по ландшафтным признакам ближе к южным склонам (Щербаков, 1970).

Расчет суммарных показателей, демонстрирующих получение прямой радиации в течение суток, показывает, что с ростом угла наклона наблюдали усиление различий. При этом поступление прямой солнечной радиации наиболее сильно различается между крайними членами ряда (рис. 6). Результаты актинометрических наблюдений в районе Кулара (Якутия, 70°38' с.ш.) показывают, что даже при небольшой крутизне

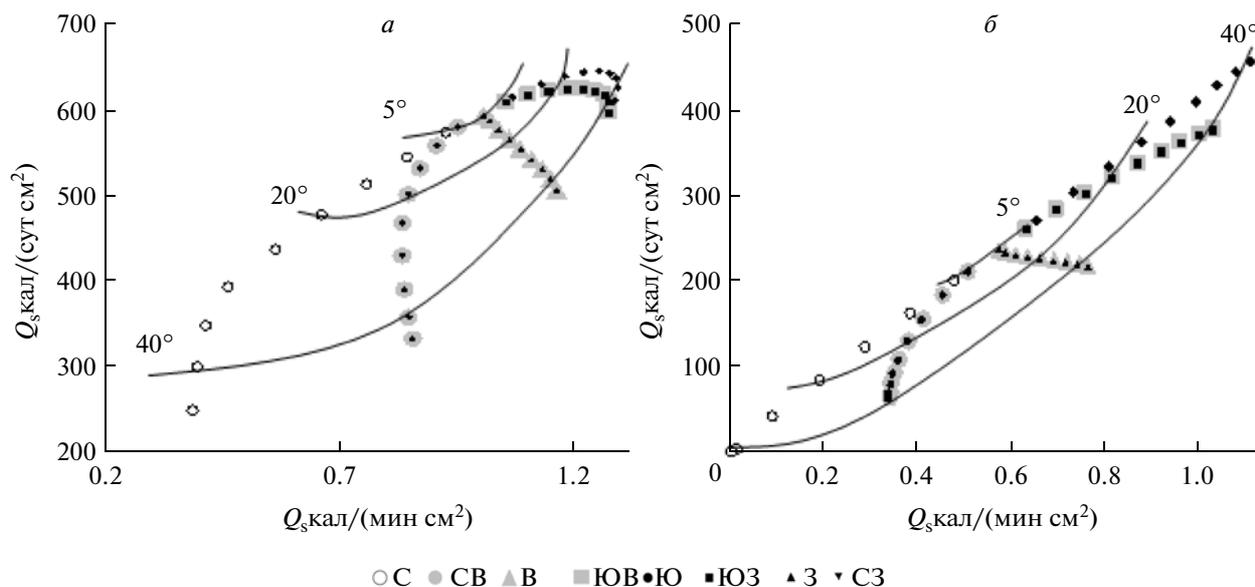


Рис. 6. Моделирование поступления прямой солнечной радиации на склоны модельного участка, имеющие различный наклон и ориентацию для дат 18.06.1988 (а) и 17.09.2001 (б). Представлены максимальные значения суточного потока (ось абсцисс), и суточная сумма (ось ординат).

южные склоны получают в среднем за лето на 13% больше, чем северные (Скрябин, Варламов, 1982). По расчетам Ю.А. Шербакова (1970), на широте района бассейна р. Сойва по отношению к горизонтальной поверхности крутые (30°) склоны южной экспозиции получают за год на 44% больше тепла, а северные – на 40% холоднее. Однако, несмотря на снижение количества прямой солнечной радиации, в сентябре различия между теплообеспеченностью склонов разной экспозиции сохранялись. Согласно данным Т. Waragai (1998), южные склоны получают больше тепла, но отличаются более значительными суточными, сезонными и годовыми колебаниями температуры.

Динамика показателя NDVI

Влияние кальциевых пород проявляется на всех уровнях организации ландшафтов территории, что отражено в повышении видового разнообразия сообществ и продуктивности экосистем (Перельман, Касимов, 1999). Одним из критериев продуктивности фитоценозов, широко используемым в исследованиях последних лет, выступает показатель NDVI. Значения индекса NDVI определяются спектральным диапазоном в интервале поглощения радиации хлорофиллом и косвенно рассматриваются как величины, отражающие распределение запаса надземной фотосинтетически-активной фитомассы, коррелируют с листовым индексом и проективным содержанием хлорофилла в ассимилирующих органах на единицу площади поверхности (хлорофилльный индекс (ХИ)) (Тужилкина, Бобкова, 2010).

Последняя величина применима для количественной оценки стока фотосинтетического связывания углерода растительными ассоциациями (Проективное содержание ..., 1995; Цельникер, Малкина, 1994; Исаев и др., 1995). В многоярусных фитоценозах формирование значений отражения для конкретных пикселей изображения определяется вкладом в суммарный спектр величин, полученных от растений различных жизненных форм, и подвержено сезонным изменениям. Для спелых хвойных насаждений значение ХИ определяется в основном автотрофной частью древостоя, достигая до 85.9% для ельника черничного (Тужилкина и др., 1998).

Анализ корреляции NDVI и ЦМР разносезонных изображений показал, что значения индекса на участках склоновых поверхностей в пределах выделенных групп сообществ существенно различаются в течение периода вегетации (рис. 7). В весенне-летний сезон на изображениях, выполненных для всех выделенных групп сообществ разноориентированных участков и склоновых поверхностей, отмечены рост средних значений параметра с 23 мая по 19 июля и последующее его снижение к 17 сентября, что связано с изменениями, происходящими в надземной фитомассе. Однако данный рост зависит не только от изменения состава пигментов: для одних хвойных пород – *Abies sibirica* и *Picea abies* – показано снижение содержания хлорофиллов в течение вегетационного периода (Силкина, Винокурова, 2009), для других – *Pinus silvestris* – на протяжении вегетационного периода отмечен их рост (Кулагина, 2010). Значения показателя NDVI варьировали в

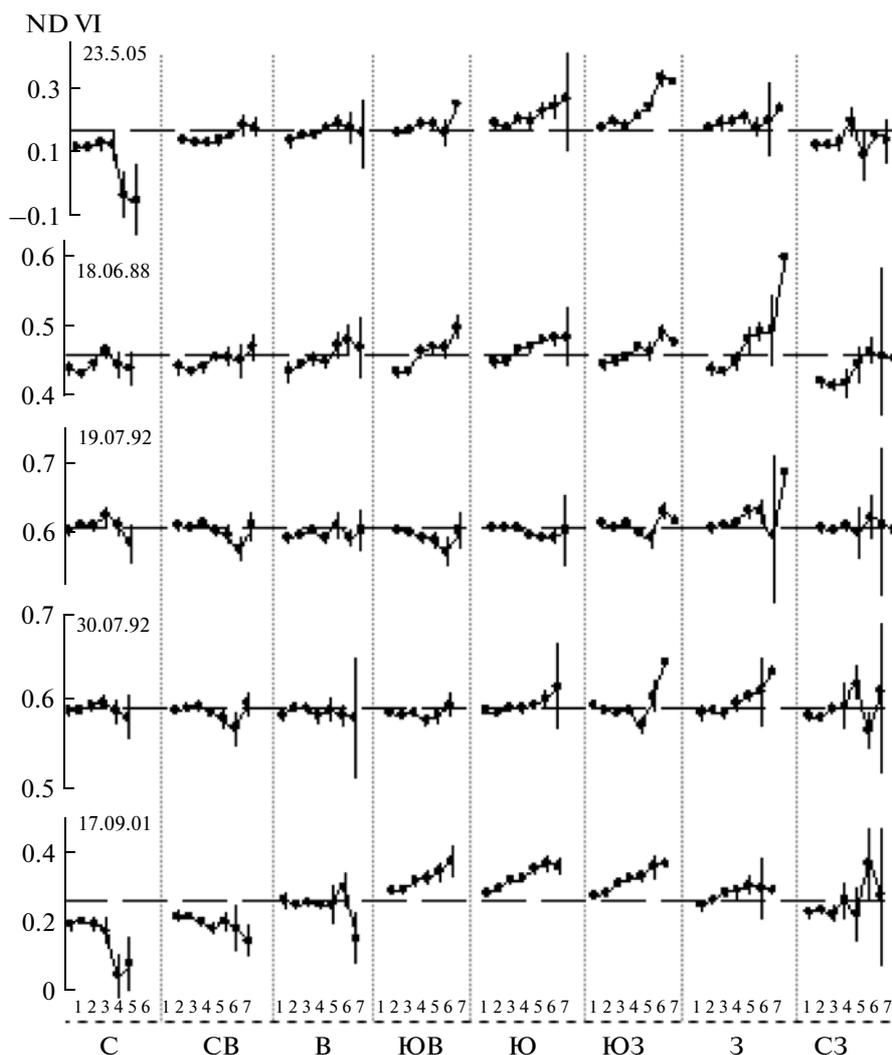


Рис. 7. Сезонная межгодовая вариабельность величин индекса NDVI для фитоценозов, представленных смешанными ельниками. Представлены средние значения для выборок и размах доверительного интервала ($P = 0.95$) для склонов различных экспозиций и углов наклона. Пунктиром обозначены средние значения для всего класса. Условные обозначения соответствуют рис. 2.

пределах выделенных групп фитоценозов от 0.11 для лиственных лесов и участков с луговой растительностью в начальный период вегетационного периода (23 мая) до 0.70 для сообществ луговой растительности (19 июля).

Вместе с тем рассмотренный показатель существенно варьировал в пределах отдельных групп сообществ и в зависимости от экспозиции и наклона склонов. Наиболее существенные и значимые различия отмечены на изображениях начала (23 мая) и окончания (17 сентября) вегетационного периода между участками, расположенными на полярных склонах (северной и южной ориентаций) для крайних рядов последовательностей склоновых поверхностей (более 20°). Для большинства рассмотренных классов поверхностей рост величин NDVI положительно коррелировал

с ростом угла наклона поверхностей, несмотря на то, что рассчитанный показатель сомкнутости крон снижался (рис. 3). Исключение составили склоны северной экспозиции, где корреляция была отрицательной. Различия между участками нивелировались к середине вегетационного периода, и к 19 июля многие участки не имели статистически значимых различий. К окончанию периода вегетации показатели снова их накапливали. Выявленные различия величин индекса формируются в результате взаимодействия отдельных факторов: влияния режима освещенности разноориентированных склоновых поверхностей, не устраненных топографической коррекцией; фенологическими различиями, связанными с запаздыванием и опережением развития, начала и окончания вегетации растений в фитоценозах разно-

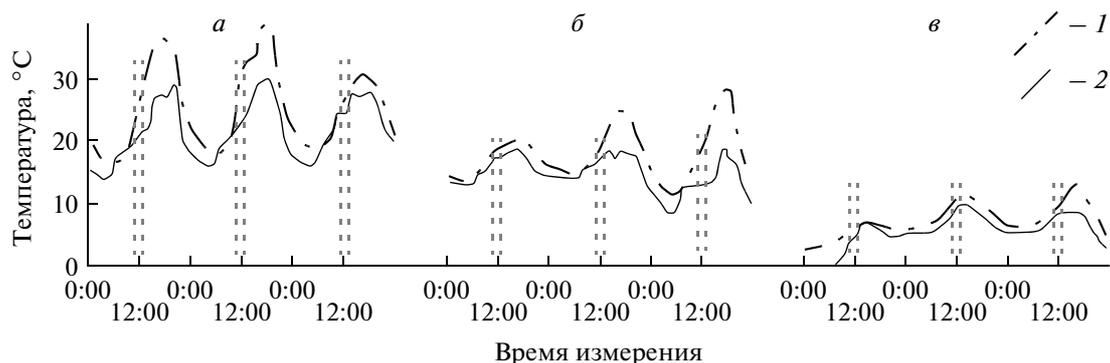


Рис. 8. Пример суточного хода температуры поверхности для склонов полярных экспозиций для периодов измерений: *a* – 16.07.2004–18.07.2004; *б* – 30.07.2004–01.08.2004; *в* – 06.09.2004–08.09.2004. Цифрами обозначены: 1 – значения температуры для склонов южной экспозиции, 2 – северной экспозиции. Выделены интервалы для времени съемки Landsat.

ориентированных склонов; а также, возможно, имеющимися, но не подтвержденными на основании анализа данных спутниковой съемки экологически определенными различиями в запасе фитомассы и структуре фитоценозов в сообществах склонов разной экспозиции (что было показано инструментальными весовыми методами измерений для степных горных пастбищ (Белусова, 2010) и лесных сообществ (Щербаков, 1970).

Подспутниковые наблюдения за температурным режимом поверхностей

Анализ температурных показателей с использованием установленных на разноориентированные участки температурных логгеров позволил охарактеризовать режим фактической теплообеспеченности открытых склонов и участков с разреженной древесной растительностью в бассейне р. Сойва (рис. 8) и подтвердить наблюдаемые на материалах спутниковой съемки температурные различия (рис. 4). Основные различия температур разноориентированных поверхностей определялись притоком прямой солнечной радиации, в дни с ясным состоянием атмосферы они были максимальны. В отдельные дни июля и августа разница температур достигала максимума (до 10–15°C) во второй половине дня (15:00–18:00). Рассмотренная территория характеризуется присутствием большого количества дней с полужасным и пасмурным состоянием атмосферы (так, в летний период вероятность пасмурного состояния неба, по данным метеостанции Троицко-Печорска, в среднем варьирует от 56% в июне до 67% в августе (Климатологический..., 1932)). В такие дни различия температур не значительны. Привлеченные к работе изображения Landsat выполнены в ясную погоду в период с 11.00 до 11.30 локального времени. Для этого периода отмечено начало ро-

ста температурных различий для разноориентированных склоновых поверхностей (интервал съемки выделен пунктиром), что и проявляется на изображениях, несмотря на значительную пространственную генерализацию. К концу вегетационного сезона, в связи со снижением высоты солнца над уровнем горизонта, температурные различия между разноориентированными поверхностям постепенно нивелируются.

Различия флористического состава склоновых участков

Растительный покров модельных склонов, формирующийся в условиях максимального диапазона микроклиматических условий на известняках в бассейне р. Сойва, отражает их экологическое своеобразие через свой флористический состав и структуру. Коэффициент сходства флористического состава (индекс Жаккара) разноориентированных склонов составил 73%. Различия в видовом составе растений четко проявляются при применении методов сравнительной флористики (географический анализ, признак широтных групп). Из 108 видов сосудистых растений, произрастающих на склонах, независимо от экспозиции встречаются почти ¼ видов, в основном это представители бореальных лесов (рис. 9) – *Abies sibirica*, *Betula pendula*, *Picea obovata*, *Pinus sibirica*, *Juniperus communis*, *Aconitum septentrionale*, *Antennaria dioica*, *Festuca ovina*, *Linnaea borealis* и др. Оставшаяся доля приходится на виды с дизъюнктивным монтанным типом ареала (*Carex alba*, *Carex ornithopoda*, *Asplenium viride*), горностепные (*Aster alpinus*), арктоальпийские (*Dryas punctata*, *Saussurea alpina*), гипоарктические и гипоарктоальпийские (*Equisetum scirpoides*, *Selaginella selaginoides*, *Pinguicula alpina*). Названия растений приведены по справочнику С.К. Черепанова “Сосудистые растения России и сопредельных государств”

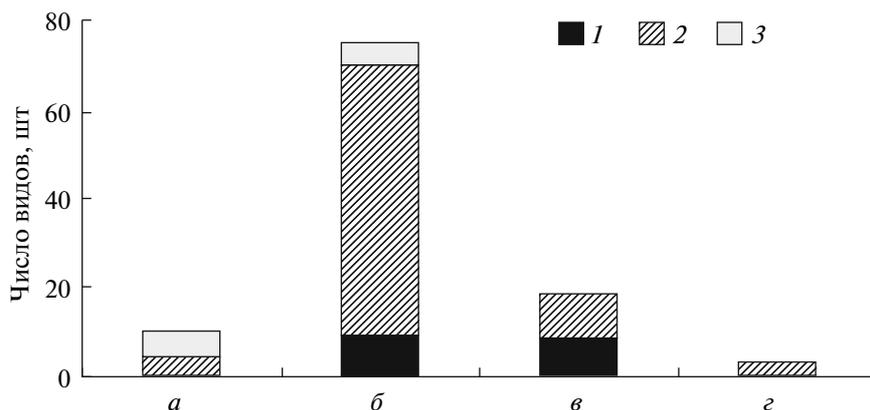


Рис. 9. Диаграмма распределения видов разных широтных групп на трансекте, заложенной через открытые склоновые участки южной и северной экспозиций. Цифрами обозначены: 1 – доля видов, отмеченных только на северном склоне, 2 – доля видов, общих для склонов разных экспозиций, 3 – отмечены на южном склоне. Буквами обозначены: а – южные виды (лесостепные, неморальные, неморально-бореальные), б – бореальные, в – северные (арктические, аркто-альпийские, голоарктические), г – скальные лесные и монтанные виды.

(1995), географические группы – по “Флоре северо-востока европейской части СССР” (Т. 1–4. 1975–1977).

Различия, связанные с приуроченностью к разным склоновым поверхностям, проявляются в распределении ¼ части видового состава. Только на южном склоне отмечено присутствие скального и южноборового вида *Dendranthema zawadskii*, лесостепного и борового – *Adonis sibirica*, видов неморального флористического комплекса – *Carex rhizina*, *Stellaria holostea*, *Viola mirabilis*, *Milium effusum*, а также ряд бореальных видов – *Fragaria vesca*, *Viola mauritii*, *Vicia sylvatica*, *Poa nemoralis*. Специфичными для северного склона являются виды с арктическим, арктоальпийским, гипоарктическим типом ареала: *Arctous alpina*, *Bistorta vivipara*, *Carex glacialis*, *Minuartia verna*, *Thephrosia integrifolia*, *Tofieldia pusilla*, *Valeriana capitata* – и некоторые влаголюбивые бореальные виды (*Bistorta major*, *Avenella flexuosa*, *Oxalis acetosella*). Согласно расчетам Ю.А. Щербакова (1970), крутые склоны северной экспозиции на 63°–65° с.ш. получают минимальное количество прямой солнечной радиации в Северном полушарии, что, возможно, является основной причиной успешного сохранения “северных” видов в лесной зоне. На оригинальность условий этих местообитаний указывает то, что 17% видового состава сосудистых растений на модельных склонах включено в списки охраняемых растений региона (Красная книга Республики Коми, 2009), для многих видов эти местообитания – краевые (пограничные) на ЕСВР.

Перераспределение тепла и влаги на разноориентированных крутых осыпных склонах прослеживается в изменениях и структуры растительного покрова. Здесь снижается ценотическая роль бореальных деревьев и кустарников, они

представлены редким подростом или образуют сильно разреженные древостои. На теплом склоне южной экспозиции под пологом таких сообществ и на открытых участках в кустарничково-травянистых группировках доминируют представители сем. Сурегасеае (*Carex alba*, *C. ornithopoda*, *C. rhizina*). На северном склоне при зарастании и закреплении осыпей важную роль играют арктоальпийский вид *Dryas punctata*, а также мхи и лишайники, которые образуют здесь хорошо развитый наземный покров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях предгорных и горных районов и территорий с разнообразными формами рельефа топографические особенности выступают важными факторами, определяющими особенности большинства локальных параметров, включающих микроклимат, характеристики растительного и почвенного покрова (Brown, 1994). В этом плане материалы спутникового мониторинга становятся важным источником данных для характеристики особенностей ландшафтной структуры территории и выделения территорий с необходимыми характеристиками. С другой стороны, преимущества использования материалов разновременной съемки определяются возможностями выявления разных форм динамики геосистем (в том числе в ходе анализа их количественных показателей), охарактеризованных В.Б. Сочавой (1972) как преобразовательной и стабилизирующей.

Количественные методы оценки параметров фитоценозов, основанные на использовании спектральных данных, в частности индекса NDVI, позволяют установить изменения, связанные с сезонными и межгодовыми процессами, или их стабильность, обусловленную ландшафтным де-

терминированием их вариабельности. Полученные результаты демонстрируют важность учета времени съемки, ориентации склоновых поверхностей при проведении не только оценки количественных параметров фитоценозов и их динамики, но и для выполнения классификации растительного покрова на территориях с разнообразными формами рельефа.

Биологическое разнообразие карстовых ландшафтов Южного Тимана значительно выше как в плане видового, так и в плане ценотического уровня в сравнении с зональными ландшафтами средней тайги. Географические реликты, сохранившиеся в составе флоры, их ассоциации, лесные ценозы с их участием, придают уникальность данным экосистемам. Только на модельном участке в бассейне р. Сойва произрастает более 40 видов сосудистых растений, мохообразных и лишайников, охраняемых на территории Республики Коми (Красная книга Республики Коми, 2009). Эти ландшафты составляют основу сети ключевых ботанических территорий ЕСВР. Сохранению реликтового комплекса растений на известняках ЕСВР способствуют географические закономерности инсоляции ландшафтов в пределах 63°–65° с.ш. — минимальное для Северного полушария количество тепла, поступающего на крутые склоны северной экспозиции, и значительные различия в поступлении прямой солнечной радиации к разноориентированным склонам. Температурный режим склоновых поверхностей модельного участка определяется развитием отдельных форм микро- и мезорельефа, приуроченностью к участкам с разной крутизной и экспозицией.

Интегрирующая роль значений температуры поверхности позволяет рассматривать данный показатель для выявления границ, площадей и особенностей приуроченности групп элементарных ландшафтных единиц и растительных сообществ, различающихся водным режимом, почвенным составом и геоморфологическими особенностями. Для зональных сообществ, приуроченных к выложенным поверхностям, температурный режим в большей степени определялся условиями увлажнения. В азональных сообществах известняковых обнажений района исследований доминирующее влияние оказывают микро- и мезорельефные условия. В ходе анализа данных температурного канала Landsat модельной территории бассейна р. Сойва установлено, что различия в теплообеспеченности склонов возрастают с увеличением крутизны, достигая максимума в июле (4–5°C) между склонами северной и южной экспозиции при угле более 30°. Температура известняковых склонов северной экспозиции обладала наименьшими значениями в сравнении со всеми рассмотренными участками (включая водораздельные) и может рассматриваться в качестве маркера для

выделения в подзоне средней тайги участков, потенциально пригодных для развития редких видов тундровых или горных ареалов. Температура южных экспозиций превышала прилегающие участки на 3–4°C, что способствовало увеличению длительности периода развития растений и продвижению к северу видов, имеющих лесостепное, южно-боровое и неморальное происхождение. Верификация полученных закономерностей показала наличие температурных различий выделенных классов поверхностей и позволила оценить роль микрорельефа.

Выполненные геоботанические и флористические исследования территории демонстрируют возможность привлечения цифровых моделей рельефа, тематических классификаций растительного покрова, полученных по спутниковым и топографическим данным при прогнозировании распределения редких и нуждающихся в охране видов растений, изучении экологически обусловленных конкурентных отношений видов растений и фитоценозов.

Авторы благодарят д.т.н. С.А. Барталева (ИКИ РАН, Москва) и д. т. н. В.Н. Копылова (ЮНИИТ, Ханты-Мансийск) за высказанные замечания к предварительной рукописи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ “Влияние климатических изменений на биоценозы ненарушенных территорий российского Севера” (проект № 10-04-92514-ИК_a) и программы отделений и Президиума РАН “Состояние ресурсов полезных растений европейского северо-востока России, мониторинг и разработка биотехнологических подходов по рациональному использованию и воспроизводству”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевко Н.А., Сваткова Т.Г.* Зимние топографические карты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 8–11.
- Алехин В.В.* Растительность СССР в основных зонах. 2-е Испр. и доп. изд. М.: Сов. наука, 1951. 512 с.
- Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. С. 343–352.
- Белоусова Л.К.* Опыт оценки кормовых ресурсов горных территорий // Всеросс. научн. конф. “Проблемы изучения и сохранения растительного мира Евразии”. Иркутск, 2010. С. 359–363.
- Ботанический заказник “Сойвинский” // Биологическое разнообразие ООПТ Республики Коми. Вып. 4.

- Охраняемые природные комплексы Тимана. Ч. 1. Сыктывкар, 2006. С. 146–218.
- Васильев В.Ф.* Интродукция новых растений на меловые обнажения Воронежской области // Тр. Воронежского гос. ун-та. 1939. Т. X. № 5.
- Виноградова Ю.А.* Состав гумуса и биологическая активность низкорослых почв Южного Тимана // Матер. XIV Всеросс. молод. науч. конф. “Актуальные проблемы биологии и экологии”. Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 3–6 апреля 2007 г. Сыктывкар, 2007. С. 34–36.
- Елсаков В.В., Марущак И.О.* Роль спутникового мониторинга в выявлении изменений растительного покрова предгорной и горной части Урала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 7. Т. 1. М.: Азбука-2000, 2010. С. 310–318.
- Елсаков В.В., Марущак И.О.* Спектрзональные спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов Приполярного Урала // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 281–286.
- Галенко Э.П.* Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойного леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1983. 129 с.
- Кадастр охраняемых природных территорий Республики Коми. Сыктывкар, 1993. 190 с.
- Кадастр охраняемых природных территорий Республики Коми. Сыктывкар, 1995. 58 с.
- Келлер Б.А.* По долинам и горам Алтая (Ботанико-географические исследования). Казань: Типография Императорского ун-та, 1914. Т. 1. 445 с.
- Климатологический справочник СССР. Вып. I. Европейская часть СССР. Л.: Главная геофизическая обсерватория, 1932. 118 с.
- Комаров Н.Ф.* Температура меловых склонов черноземной полосы в связи с условиями развития на них эндемичной флоры // Сов. ботаника. 1933. № 5.
- Компоненты экосистем и биоразнообразие карстовых территорий Европейского Севера России (на примере заповедника “Пинежский”). Архангельск, 2008. 352 с.
- Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П.* Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 215 с.
- Коржинский С.И.* Термические наблюдения, произведенные на Кликовском склоне П. Крыловым и С. Коржинским в 1885 г. // Тр. общ. естествоисп. при Импер. Казан. ун-те. Казань, 1889. Т. XIX. С. 1–12.
- Красная Книга Республики Коми / Под. ред. Таскаева А.И. Сыктывкар, 2009. 792 с.
- Кулагина Л.С.* Состояние хлорофилл-белкового комплекса сосны обыкновенной в условиях техногенеза // Всер. науч. конф. “Проблемы изучения и сохранения растительного мира Евразии”. Иркутск, 2010. С. 504–507.
- Осинов С.В.* О системе методов детально-маршрутных исследований растительного покрова // Сиб. Экол. журн. 2002. № 2. С. 145–155.
- Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрейя-2000, 1999. 768 с.
- Пономарев А.Н.* Температурный микроклимат и растительность известняков и гипсов Среднего Урала и Западного Приуралья в зависимости от экспозиции // Уч. Зап. Молотовского гос. ун-та. Молотов, 1940. Т. 4. Вып. 1. С. 166–201.
- Проективное содержание хлорофилла и биоразнообразия растительности основных ботанико-географических зон России / Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А. и др. // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 2. С. 295–302.
- Роль известняков Тимана в сохранении биоразнообразия / Тетерюк Л.В., Мартыненко В.А., Пыстина Т.Н. и др. // Междунар. контактный форум по сохранению местообитаний в Баренцевом регионе: Тез. докл. 4-го совещания. Сыктывкар, Республика Коми, 19–25 сентября 2005 г. Сыктывкар, 2005. С. 175–176.
- Силкина О.В., Винокурова Р.И.* Сезонная динамика содержания хлорофиллов и микроэлементов в формирующейся хвое *Abies sibirica* и *Picea abies* // Физиология растений. 2009. Т. 56. № 6. С. 864–870.
- Скрябин П.Н., Варламов С.П.* Формирование теплового режима грунтов на склонах в районе Кулара // Термика почв и горных пород в холодных регионах. Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. С. 5–43.
- СНиП 23-01-99. Строительная климатология. 01.01.2000.
- Сочава В.Б.* Геотопология как раздел учения о геосистемах // Топологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1972. С. 34–108.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.
- Структура и динамика природных компонентов Пинежского заповедника (северная тайга ЕТР, Архангельская область). Биоразнообразие и георазнообразие в карстовых областях. Архангельск, 2000. 267 с.
- Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П.* Оценка баланса углерода лесного фитоценоза // Физиология растений. 1998. Т. 45. С. 914–918.
- Тужилкина В.В., Бобкова К.С.* Хлорофилльный индекс в фитоценозах коренных ельников Европейского северо-востока // Лесной журн. 2010. № 2. С. 17–23.
- Флора северо-востока европейской части СССР / Под ред. Федорова А.А. Л.: Наука, 1974. Т. 1. 273 с. 1976. Т. 2. 315 с. 1976. Т. 3. 293 с. 1977. Т. 4. 311 с.
- Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- Цельникер Ю.Л., Малкина И.С.* Хлорофилльный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41. № 3. С. 325–330.
- Щербаков Ю.А.* Поступление и отражение прямой солнечной радиации на неодинаково ориентированных склонах в разных условиях // Влияние экспозиции на ландшафты. Пермь, 1970. № 240. С. 100–133.

- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И. и др.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор). М.: Центр экологической политики России, 1995. 156 с.
- Юдин Ю.П.* Реликтовая флора известняков Северо-востока европейской части СССР // Материалы по истории флоры и растительности СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. Вып. 4. С. 493–587.
- Brown D.G.* Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables // *J. Veget. Sci.* 1994. V. 5. P. 641–656.
- Chander G., Markham B.* Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2003. V. 41. № 11. P. 2674–2677.
- Holland P.G., Stein D.G.* Vegetational responses to latitudinal variations in slope angle and aspect // *J. Biogeogr.* 1975. V. 2. № 3. P. 179–183.
- Kraus G.* Boden und Klima auf kleinstem Raum. Jena, 1911. P. 184.
- Teillet P.M., Guindon B., Goodeonugh D.G.* On the slope-aspect correction of multispectral scanner data // *Can. J. Rem. Sens.* 1982. V. 8. P. 84–106.
- Waragai T.* Effects of rock surface temperature on exfoliation, rock varnish, and lichens on a boulder in the Hunza Valley, Karakoram Mountains, Pakistan // *Arctic and Alpine Res.* 1998. V. 30. P. 184–192.

Satellite Images for Investigation of Topography Effect on Floristic Biodiversity of Karst Landscapes Phytocenosis in the North-East Part of European Russia

V. V. Elsakov, L. V. Teteryuk

Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar

Phytocenoses in calcareous outcrops of the Soiva river basin (Pechora river tributary) were investigated using the remote sensing data of Landsat and Aster (digital elevation model) satellites, GIS modeling methods, field measurements and temperature loggers' results. Localization of vegetation communities on various exposures and slope surfaces was the main cause of differences in observed characteristics as temperature regime, seasonal phytomass development and duration of vegetation period, formation of species composition and structure of vegetation communities. The distinctions in NDVI values and surface temperatures were at their maximum at satellite images in the beginning and the end of vegetation period, for communities located on extreme slope surfaces of polar exposures on territorially interfaced landscapes. The presence of nemoral and tundra floristic complexes in adjacent sites located in different relief elements characterizes these differences as attributed to geographical zones.

Keywords: karst landscapes, satellite monitoring, floristic biodiversity, different oriented slopes and aspects