

СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМ В СУБАРКТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ ТУНДРОВОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2015 г. Л. Л. Голубятников^{1,*}, Е. А. Заров², В. С. Казанцев¹,
И. В. Филиппов², Г. О. Гаврилов³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*E-mail: golub@ifaran.ru

Поступила в редакцию 19.05.2014 г.

Исследована структура ландшафтов типичной и южной тундровых подзон Западной Сибири по космическим снимкам со спутников Landsat и WorldView. На основе спутниковой информации и учета данных полевых исследований выделены типы микроландшафтов для рассматриваемых регионов и определены их площади. Определены площади основных болотных ландшафтов в различных типах болот севера Западной Сибири.

Ключевые слова: тундровая зона, Западная Сибирь, элементы ландшафта, космические снимки

DOI: 10.7868/S0205961415030057

ВВЕДЕНИЕ

Одним из источников информации о состоянии наземных экосистем являются данные дистанционного зондирования Земли. Космический мониторинг территории позволяет исследовать экосистемы в районах, в которых проведение широкомасштабных полевых работ связано с большими сложностями или невозможно. Тундровая зона Арктики относится к малодоступным для наземных исследований регионам. Данные, получаемые с искусственных спутников Земли, позволяют анализировать состояние наземных экосистем этого региона (Елсаков, 2013; Корниенко, Якубсон, 2011; Raynolds et al., 2008), изучать динамику его растительного покрова (Тутубалина, 2006; Варламова, Соловьев, 2012; Olthof, Pouliot, 2010), исследовать криогенные изменения рельефа (Брыксина, Кирпотин, 2012; Кравцова, Быстрова, 2009; Riordan et al., 2006), осуществлять мониторинг температурно-влажностных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности (Покровский, 2007; Голубятников, Денисенко, 2006; Поляков и др., 2009).

Современное глобальное изменение климата наиболее остро проявляется в арктических и умеренных широтах (Bindoff et al., 2013). С конца 1980-х годов скорость повышения среднегодовой температуры воздуха в северных регионах Евразии составляет 0.4–0.5°C/10 лет (Методы..., 2012). За последние три десятилетия среднегодовая температура воздуха на севере России повы-

силась на 0.8–1.3°C, причем тренд повышения температуры воздуха в этом регионе за длительный холодный период в 1.2–1.5 раза больше, чем за короткий теплый (Павлов, 2008). В дальнейшем, согласно оценкам, полученным с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана, существенные климатические изменения, в первую очередь повышение температуры воздуха и увеличение количества осадков, ожидаются также в арктических регионах (Collinz et al., 2013).

Запас углерода в органическом веществе почв высоких широт Северного полушария оценивается в 1400–1850 Гт (McGuire et al., 2009). Потепление климата в этом регионе приведет к ускорению деградационных процессов в многолетнемерзлых грунтах региона и окажет существенное влияние на интенсивность обменных потоков углерода между атмосферой и тундровыми экосистемами. В частности, в результате увеличения глубины сезонного оттаивания арктических почв в активный биохимический круговорот будет включен углерод, законсервированный на данный момент в верхних слоях мерзлой толщи почв. В результате ожидаемого потепления климата в Арктике может существенно увеличиться поступление углекислого газа и метана в атмосферу из экосистем этого региона.

Эмиссия парниковых газов из болотных экосистем северного региона существенным образом зависит от совокупности микроландшафтов, образующих каждую экосистему. Обобщения экс-

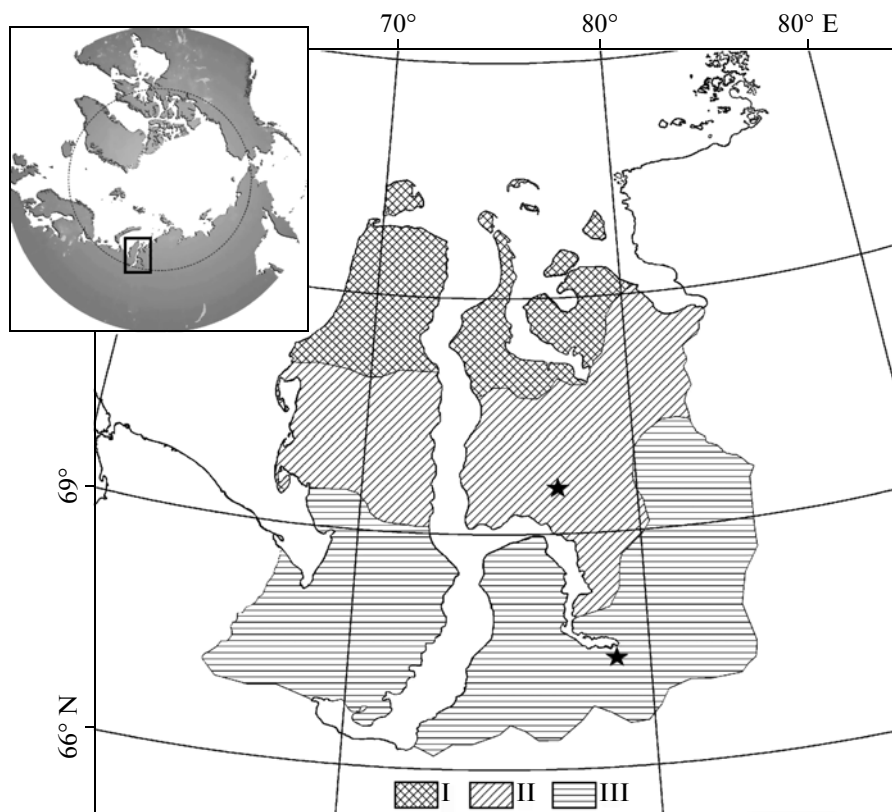


Рис. 1. Ботанико-географическая зональность тундр Западной Сибири и месторасположение ключевых участков полевых наблюдений. Подзоны тундры: I – арктическая тундра; II – типичная тундра; III – южная тундра. Участки наблюдений отмечены звездочками.

периментальных оценок эмиссии метана и углекислого газа из тундровых экосистем высоких широт Северного полушария (Казанцев, 2013; Наумов 2009; Карелин, Замолотчиков, 2008) указывают на существенное отличие интенсивностей потоков этих газов из разных микроландшафтов рассматриваемых экосистем в атмосферу (например, эмиссия метана из мерзлых бугров и болотных топей может отличаться на порядок). Для корректного определения региональной эмиссии парниковых газов из северных экосистем по точечным экспериментальным данным требуется знание не только площади различных типов болот и суходолов изучаемой территории, но и соотношения площадей слагающих их микроландшафтов.

В настоящей работе проанализирована ландшафтная структура тундровых экосистем Западной Сибири на основе материалов спектральных спутниковых съемок и данных полевых исследований.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно ботанико-географической зональности Западной Сибири (Лисс и др., 2001), тунд-

ровая зона этого региона подразделяется на арктическую, типичную и южную подзоны (рис. 1). Для рассматриваемой территории характерен холодный гумидный климат: среднегодовые температуры воздуха отрицательные, количество годовых осадков около 300 мм (табл. 1). Тундровые экосистемы занимают более 340 тыс. км² территории Западной Сибири. Для этого региона характерна равнинная местность с полигональными и плоскобугристыми болотами (табл. 2). Рельеф болот представляет собой сочетание повышений, образованных торфяными буграми и валиками, мерзлыми буграми пучения, кочками, и понижений, называемых мочажинами, различающихся степенью обводненности и составом растительности. В понижениях встречаются небольшие по площади внутриболотные озера. Озера тундровой зоны подразделяются по типу происхождения на термокарстовые, пойменные и ледниковые. В котловинах спущенных термокарстовых озер, называемых хасыреями, встречаются заболоченные участки, формирующие бугры пучения и мелкие озера.

Согласно оцифрованной типологической карте болот (Романова и др., 1977), значительная территория (около 58%) тундровой зоны рассматри-

Таблица 1. Основные территориально-климатические характеристики тундровых подзон Западной Сибири: T – среднесуточная приповерхностная температура; P – осадки; $T_{>0}$ – сумма положительных среднесуточных приповерхностных температур; Veg – длина периода со среднесуточной приповерхностной температурой не менее $+5^{\circ}\text{C}$; S – площадь

Тундровая подзона	$T, ^{\circ}\text{C}$			$P, \text{мм/год}$	$T_{>0}, ^{\circ}\text{C}$	$Veg, \text{сут}$	$S, \text{тыс. км}^2$
	год	январь	июль				
Арктическая тундра	–10.9	–24.8	5.1 (август)	310	398	67	57.5
Типичная тундра	–8.7	–24.3	9.8	288	827	96	110.0
Южная тундра	–8.2	–24.2	10.9	330	935	100	176.0

Примечание. Основные климатические характеристики определены на основе данных метеорологических станций им. Попова и Диксон (арктическая тундра), Антипаюпа и Марресала (типичная тундра), мыс Каменный и Новый Порт (южная тундра) за период с 1980 по 2005 гг. (Сайт ВНИИГМИ).

ваемого региона слабо заболочена – переувлажненные экосистемы занимают на ней менее 10% площади. Около 23% северной территории Западной Сибири заболочено от 10 до 50%. На незначительной части (менее 9%) территории западно-сибирской тундры болотные ландшафты занимают более 80% площади (рис. 2). Наиболее заболоченные территории расположены на северо-востоке п-ова Ямал, в центральной части Тазовского п-ова и на севере Гыданского п-ова.

Для анализа структуры ландшафтов региона были выбраны два ключевых участка, расположенных в типичной и южной тундрах Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 1). На этих участках представлены микроландшафты, характерные соответствующим тундровым подзонам: мерзлые бугры пучения, торфяные бугры и валики, мочажинны разных типов, внутривалотные озера, озера, суходолы. На территориях этих участков летом

2013 г. проводились полевые исследования, во время которых фиксировались метеорологические параметры и интенсивности потоков метана в атмосферу с различных тундровых микроландшафтов, изучался растительный и почвенный покровы, были определены местоположения основных микроландшафтов.

Согласно типологической карте болот (Романова и др., 1977), на ключевом участке в типичной тундре распространены полигонально-валиковые и полигонально-трещиноватые болота. Болота ключевое участка южной тундры представлены кустарничковыми мелкопочковатыми плоскобугристыми болотами, небольшие торфяные бугры которых разделены неглубокими топями. Распространенные на ключевых участках хасыреи частично заболочены.

Озера на ключевых участках представляют собой типичные для северной части Западной Сибири мелкие (2–3.5 м глубиной) и небольшие по площади (4×10^3 – $2 \times 10^6 \text{ м}^2$) водоемы с пологими, местами заболоченными берегами.

В данной работе использованы спутниковые изображения с космических аппаратов Landsat 5, Landsat 8 и WorldView-2. При анализе использовались снимки со спутников среднего разрешения Landsat 5 и Landsat 8 в синем (450–515 нм), зеленом (525–605 нм), красном (630–690 нм), ближнем (750–900 нм) и среднем (1360–2350 нм) инфракрасных (ИК) диапазонах спектра. Пространственное разрешение используемых спектральных каналов съемки составляет 30 м на пиксел, радиометрическое разрешение – 8 бит. Снимки этих космических аппаратов охватывают территорию 36.2 тыс. км². Используемые данные имеют уровень обработки, который включает радиометрическую коррекцию, привязку по орбитальным параметрам, приведение в стандартную картографическую проекцию (UTM). Материалы спутниковой съемки Landsat 5 и Landsat 8 находятся в свободном доступе и получены с сайта геологической службы США (<http://earthexplorer.usgs.gov>).

Таблица 2. Относительные площади типов болот тундровой зоны Западной Сибири

Тип болота согласно (Романова и др., 1977)	Площадь болот (% площади тундровой подзоны)		
	арктическая тундра	типичная тундра	южная тундра
Тип 1	21.2	9.6	8.0
Тип 2	7.0	9.4	2.7
Тип 3	0.2	0.5	5.4
Тип 4	0.0	0.0	0.1
Тип 5	0.0	0.0	0.7

Примечание. Тип 1 – полигонально-валиковые и полигонально-трещиноватые; тип 2 – полигональные в сочетании с травяными и травяномоховыми; тип 3 – плоскобугристо-мочажинные и плоскобугристо-мочажинноозерковые; тип 4 – плоскобугристые в сочетании с крупнобугристыми; тип 5 – кустарничковые мелкопочковатые.

Спутник сверхвысокого разрешения WorldView-2 кроме традиционных спектральных каналов съемки синего (450–510 нм), зеленого (510–580 нм), красного (630–690 нм), ближнего ИК (БИК) (770–790 нм) имеет четыре дополнительных: голубой (400–450 нм), желтый (580–620 нм), крайний красный (700–740 нм) и БИК-2 (860–1040 нм). Пространственное разрешение получаемых изображений для каждого канала составляет 2 м. В данном исследовании использовались спутниковые снимки в проекции UTM на эллипсоиде WGS-84 в формате GeoTiff с радиометрическим разрешением 16 бит для ключевых участков площадью 40 км² в южной тундре и 25 км² в типичной тундре. Права на используемые данные с космического аппарата WorldView-2 приобретены ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Выбор космических снимков был обусловлен отсутствием на рассматриваемых ключевых участках снежного покрова, наличием минимальной облачности на снимках Landsat и отсутствием облачности на снимках WorldView-2. В результате для исследования участка типичной тундры выбраны космические снимки от 18.07.2013 (Landsat-8) и 13.09.2011 (WorldView-2). Для анализа участка южной тундры использованы космические снимки от 17.07.2006 (Landsat-5) и 22.06.2012 (WorldView-2). Используемые в данном исследовании снимки со спутников Landsat охватывали участки площадью 35.3 тыс. км² в типичной тундре и 29.7 тыс. км² в южной тундре.

Анализ ландшафтной структуры тундровых экосистем Западной Сибири был сделан на основе спутниковых снимков и данных полевых исследований. Дешифрирование снимков и выделение классов ландшафтов земной поверхности проводилось с помощью программного пакета GRASS 6.4.3. При анализе снимков спутника Landsat проведена классификация с обучением. Выбор обучающих полигонов осуществлялся вручную на основе экспертных оценок и данных полевых исследований. Для каждого выделенного класса было использовано около 30 обучающих полигонов. Точность классификаций определялась методом каппа-статистики (Richards, Jia, 2006). При анализе снимков спутника WorldView-2 для выявления максимальных различий по спектральным яркостям применялся метод главных компонент (Lillesand et al., 2004). Для первых трех компонент проведена классификация с обучением. Сопоставление выделенных классов на снимках спутника WorldView-2 с классами соответствующих снимков спутника Landsat проведено с помощью модуля "r.statistics" используемого пакета GRASS.

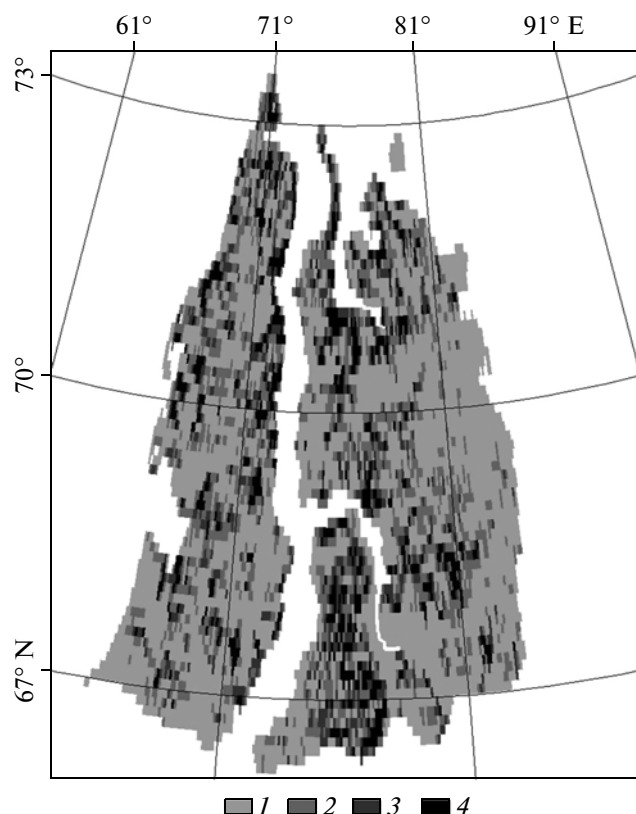


Рис. 2. Заболоченность территории тундровой зоны Западной Сибири, %: 1 – менее 10; 2 – 10–50; 3 – 50–80; 4 – более 80.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ снимков спутника среднего разрешения Landsat позволил выделить 11 классов тундровых ландшафтов (табл. 3). Точность классификаций по методу каппа-статистики соответствует удовлетворительному уровню – для снимка участка южной тундры каппа-индекс равен 85%, для снимка участка типичной тундры – 72%. Незначительная часть (около 1%) территории на снимке южной тундры закрыта облаками, идентификация ландшафтов на этой части территории невозможна. Согласно проведенному анализу спутниковой информации под поймами рек, речными наносами песка, дорогами находится около 3 и 10% площадей типичной и южной тундр соответственно. Суходолы и сухие хасыреи занимают около 60% территории рассматриваемых тундровых подзон. Переувлажненные экосистемы и водоемы локализованы приблизительно на 38 и 28% площадей снимков типичной и южной тундр соответственно.

Выделенные по снимкам Landsat тундровые ландшафты были проанализированы на более детальных изображениях ключевых участков, полученных со спутника WorldView-2. Этот анализ с привлечением данных полевых наблюдений поз-

Таблица 3. Структура площадей тундровых ландшафтов Западной Сибири

Тип ландшафта	Доля площади ландшафта на спутниковом снимке Landsat, %		Доля площади ландшафта на спутниковом снимке WorldView-2, %	
	типичная тундра	южная тундра	типичная тундра	южная тундра
Водная поверхность	8.0	7.6	14.6	4.8
Суходол с кустарничково-травяно-лишайниковым покровом	40.6	41.0	8.3	44.8
Суходол с зарослями кустарников	3.7	7.7	—	21.1
Хасырей	13.1	14.8	11.3	3.8
Заболоченный хасырей	8.0	4.8	4.2	4.7
Мочажина (тип 1)	11.2	10.1	8.3	3.7
То же (тип 2)	8.8	1.6	30.3	1.8
То же (тип 3)	—	0.5	—	2.0
Бугристо-мочажинный комплекс	3.8	1.2	11.1	13.3
Речные поймы	2.8	6.0	—	—
Пески, дороги	0.0	3.6	—	—
Территория с облаками	—	1.1	—	—

волил выделить 19 классов земной поверхности (микроландшафтов) в южной тундре и 24 микроландшафта в типичной тундре. Результаты классификации микроландшафтов ключевых участков представлены в табл. 4 и 5. Водные экосистемы ключевого участка южной тундры подразделены на глубоководную часть, лишенную надводного растительного покрова (микроландшафт “водная поверхность”), мелководную часть с разреженным надводным растительным покровом (микроландшафт “мелководье”) и внутриболотные озерки. Водные экосистемы ключевого участка типичной тундры представлены микроландшафтами водная поверхность, мелководье и “мелководье-сплавина”. Микроландшафт мелководье-сплавина представляет собой мелководную часть водоема, заросшую болотной растительностью. На ключевых участках типичной и южной тундры выделены так же микроландшафты на суходолах и сухих хасыреях (семь и пять типов соответственно), на болотных возвышениях (по два типа), на мочажинах (семь и четыре типов) и на обводненных мочажинах (по пять типов). Следует отметить, что имеющие одинаковые названия микроландшафты типичной и южной тундр отличаются составом растительного покрова и степенью обводненности.

При анализе снимка WorldView-2 ключевого участка на территории типичной тундры микроландшафт “внутриболотные озерки” выявлен не был. Дополнительный визуальный экспертный анализ этого снимка позволил определить местонахождения достаточно малых по площади водных поверхностей внутриболотных озерков и вычислить их суммарную площадь. Проведенное исследование показало, что при классификации

микроландшафтов данного спутникового снимка внутриболотные озерки были включены в классы разнообразных обводненных мочажин. Проведенный расчет площади водной поверхности внутриболотных озерков показал, что озерки в типичной тундре занимают менее 4% площади обводненных мочажин.

На рис. 3 для иллюстрации показаны фрагменты дешифрованных космических снимков Landsat и WorldView-2 с выделенными на них классами ландшафтов и микроландшафтов для ключевого участка южной тундры. Из приведенного фрагмента снимка Landsat следует, что рассматриваемый ключевой участок содержит все основные классы ландшафтов южной тундры, которые выделяются на всем снимке. Фрагменты снимка WorldView-2 демонстрируют, насколько более детальную ландшафтную структуру изучаемой территории можно получить при использовании данных со спутников сверхвысокого разрешения по сравнению с данными, получаемыми со спутников среднего разрешения: на фрагментах (б) и (в) снимка WorldView-2 выявлены соответственно восемь и десять микроландшафтов, в то время как на соответствующих фрагментах снимка Landsat выделены только по пять типов ландшафтов.

Сопоставление выделенных классов ландшафтов с типами микроландшафтов для территорий снимков WorldView-2 позволило определить доли рассматриваемых микроландшафтов в каждом ландшафтном классе. На основе этих данных были вычислены площади каждого микроландшафта на рассматриваемых снимках спутника Landsat (см. табл. 4 и 5). Следует отметить, что вычислен-

Таблица 4. Структура площадей микроландшафтов типичной тундры Западной Сибири

Тип микроландшафта	Доля площади микроландшафта на спутниковом снимке, %	
	WorldView-2	Landsat
Водная поверхность	11.8	12.6
Мелководье	3.0	1.9
Мелководье-сплавина	0.1	0.1
Кустарничково-лишайниковые сообщества (тип 1) на суходоле	7.8	10.2
То же (тип 2) на суходоле	4.5	6.4
Лишайниково-кустарничковые сообщества на суходоле	5.4	4.9
Лишайники на суходоле	1.5	1.7
Лишайники (тип 1) на буграх пучения и бугорках болот	3.1	1.0
То же (тип 2)	4.8	1.5
Травяно-кустарничково-моховые сообщества на хасырее	5.2	3.2
Травяно-моховые сообщества на хасырее	1.9	1.2
Травяно-зеленомошные сообщества на хасырее	1.5	1.1
Обводненная осоковая мочажина (тип 1) на хасырее	6.0	5.8
То же (тип 2)	0.5	0.3
Обводненная осоково-сфагновая мочажина (тип 1) на хасырее	1.5	1.8
То же (тип 2)	0.3	0.4
Кустарничково-зеленомошные сообщества на полигонах болот	9.2	10.8
Травяно-моховые сообщества на полигонах болот	6.3	4.4
Обводненная пушицево-сфагновая мочажина в понижениях между полигонами болот	5.4	4.7
Мочажина с моховым покровом	1.9	1.4
Осоково-сфагновая мочажина (тип 1)	7.2	4.6
То же (тип 2)	2.9	2.2
» (тип 3)	5.7	4.8
» (тип 4)	2.4	2.2

ные доли площадей микроландшафтов на снимках WorldView-2 и Landsat достаточно близки. Согласно спутниковым данным, заболоченность исследуемых районов типичной и южной тундры составляет 52 и 34% соответственно (рис. 4). Полученные оценки заболоченности территорий превосходят аналогичные значения, рассчитанные как на основе типологической карты болот (23 и 32% соответственно), так и на основе снимков только спутника Landsat (32 и 18% соответственно). Этот факт указывает на недооценку территории распространения переувлажненных экосистем на типологической карте болот и на более низкий уровень точности классификации ландшафтов, полученной на основе только снимков спутника Landsat. Экосистемы на минеральных почвах (суходолах) достаточно широко распространены в исследуемых тундровых районах. По полученным оценкам они занимают около 34% территории типичной тундры и около 43% территории южной тундры. Согласно типологической карте болот, экосистемы суходолов и озер зани-

мают почти 77 и 68% площадей типичной и южной тундр соответственно.

Озера в исследуемых районах занимают около 11 и 12% территорий типичной и южной тундр соответственно. Согласно полученным оценкам для площадных характеристик микроландшафтов в южной тундре, площадь зеркала воды глубоководной части озер составляет около 58.7% площади озер, площадь мелководной части озер – 41.3%. Аналогичные оценки для типичной тундры составляют 81.7 и 17.5% соответственно. В изучаемом районе типичной тундры выявлен также микроландшафт прибрежной части озер “озерная сплавина”. Площадь этого микроландшафта составляет около 0.8% всей площади озер. Из полученных оценок следует, что тундровые озера имеют достаточно большую мелководную зону – 18–41% площади озера. Согласно выводам авторов работы (Bastviken et al., 2004), мелководная прибрежная зона озер занимает не более 15% их площади.

На рис. 5 приведены соотношения площадей основных групп болотных микроландшафтов для

Таблица 5. Структура площадей микроландшафтов южной тундры Западной Сибири

Тип микроландшафта	Доля площади микроландшафта на спутниковом снимке, %	
	WorldView-2	Landsat
Водная поверхность	7.1	7.3
Мелководье	3.8	5.2
Озерки	2.7	4.9
Лишайники на суходоле	7.1	5.2
Лишайниково-кустарничковые сообщества на суходоле	4.2	3.5
Кустарничково-лишайниковые сообщества на суходоле	16.7	13.8
Кустарнички и лишайники на бугорках суходолов	2.2	1.9
Кустарники на суходоле	22.9	19.1
Кустарнички на полигонах болот	3.9	3.0
Лишайники на буграх пучения и бугорках болот	2.7	2.2
Мочажина с моховым покровом	1.1	0.9
Осоково-сфагновая мочажина (тип 1)	1.7	1.4
То же (тип 2)	0.3	0.4
То же (тип 3)	0.2	0.2
Обводненная осоковая мочажина на хасырее	0.2	0.2
Обводненная осоково-пушицево-сфагновая мочажина	10.2	9.0
Обводненная осоково-сфагновая мочажина (тип 1)	2.1	1.9
То же (тип 2)	4.6	3.7
То же (тип 3)	6.1	5.7

Таблица 6. Относительные площади микроландшафтов болот тундровой зоны Западной Сибири

Тип болота	Площадь болотных микроландшафтов (% площади болота)			
	бугры, валики	мочажина	обводненная мочажина	внутриболотные озерки
Типичная тундра				
Тип 1	6.3	65.1	26.9	1.7
Тип 2	4.8	66.2	26.7	2.3
Тип 3	5.2	65.8	28.3	0.7
Южная тундра				
Тип 1	6.5	18.5	64.1	10.9
Тип 2	7.1	18.1	65.4	9.4
Тип 3	6.9	17.7	65.6	9.8
Тип 5	7.5	20.2	57.9	14.4

Примечание. Названия типов болот указаны в табл. 2.

рассматриваемых тундровых районов. Незначительная часть (6–7%) заболоченных территорий занята буграми и валиками, которые образуют возвышения в ландшафтах болотных экосистем. На большей части переувлажненных территорий тундры расположены мочажины и озерки. В исследуемом районе типичной тундры наиболее распространены мочажинные микроландшафты, которые занимают около 66% территории. В изу-

чаемом районе южной тундры под обводненными мочажинами и внутриболотными озерами находится более 80% территории.

На основе типологической карты болот Западной Сибири и данных дешифровки спутниковых изображений проведена оценка площадей рассматриваемых микроландшафтов в различных типах тундровых болот. Результаты расчетов представлены в табл. 6. В связи с тем, что занима-

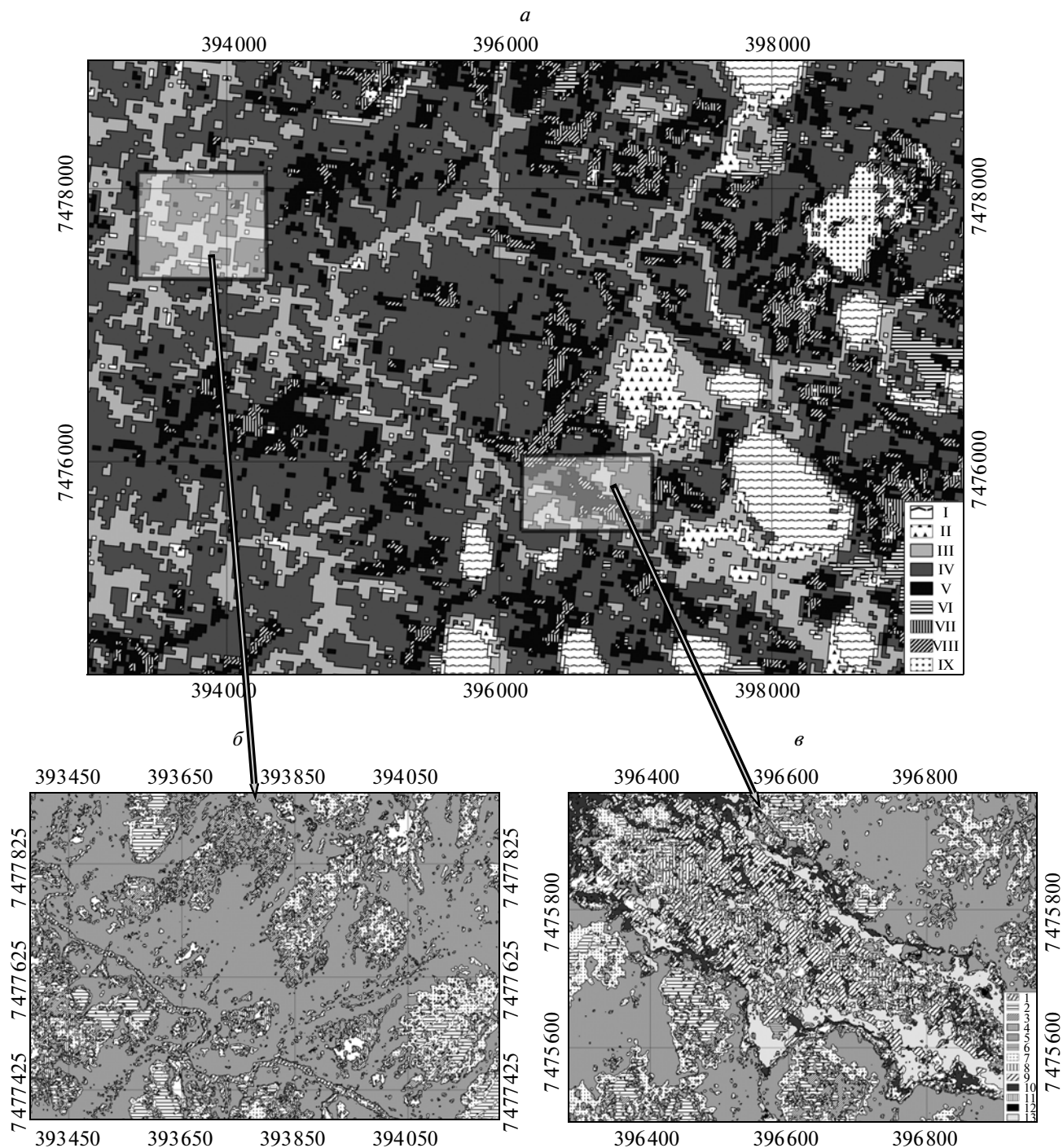


Рис. 3. Фрагменты дешифрированных космических снимков Landsat (а) и WorldView-2 (б, в) с выделенными на них классами ландшафтов и микроландшафтов для ключевого участка южной тундры. Типы ландшафтов: I – водная поверхность; II – хасырей; III – суходол с зарослями кустарников; IV – суходол с кустарничково-травяно-лишайниковым покровом; V – бугристо-мочажинный комплекс; VI – мочажина (тип 3); VII – мочажина (тип 2); VIII – мочажина (тип 1); IX – заболоченный хасырей. Типы микроландшафтов: 1 – мелководье; 2 – лишайники на суходоле; 3 – лишайниково-кустарничковые сообщества на суходоле; 4 – кустарнички и лишайники на бугорках суходолов; 5 – кустарнички на суходоле; 6 – обводненная осоково-сфагновая мочажина (тип 1); 7 – кустарничково-лишайниковые сообщества на суходоле; 8 – кустарнички на полигонах болот; 9 – обводненная осоково-сфагновая мочажина (тип 2); 10 – обводненная осоково-сфагновая мочажина (тип 3); 11 – лишайники на буграх пучения и бугорках болот; 12 – мочажина с моховым покровом; 13 – обводненная осоково-пушицево-сфагновая мочажина. Указанные координаты в системе WGS84/UTM.

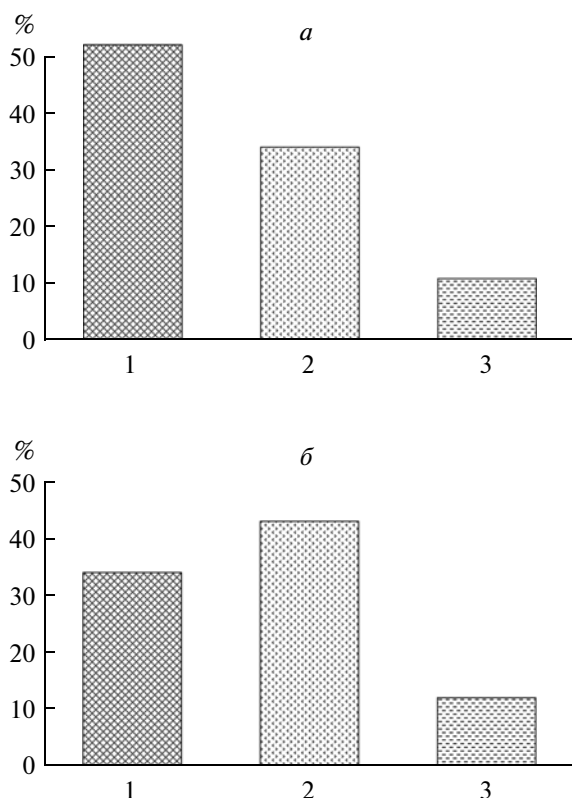


Рис. 4. Относительные площади болотных (1), суходольных (2) экосистем и озер (3) в типичной (а) и южной (б) тундровых подзонах Западной Сибири (% площади подзоны).

ющие менее 0.1% территории южной тундры плоскобугристые в сочетании с крупнобугристыми болота отсутствуют на анализируемых спутниковых снимках, площади микроландшафтов в этом типе болот не были определены и отсутствуют в указанной таблице. Из полученных оценок следует, что разнообразные по растительному покрову и уровню обводнения мочажинные микроландшафты занимают более 78% площади во всех типах болот типичной и южной тундр Западной Сибири. Площади, занимаемые торфяными валиками и разного типа буграми в переувлажненных экосистемах региона, не значительны (до 8% площади болот). Доля внутриболотных озерков в болотных массивах типичной тундры невелика (до 2% площади). В болотных экосистемах южной тундры внутриболотные озерки занимают от 9 до 14% площади болот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ ландшафтной структуры тундровых экосистем Западной Сибири на основе спутниковых снимков с космических аппаратов Landsat, WorldView-2 и данных полевых иссле-

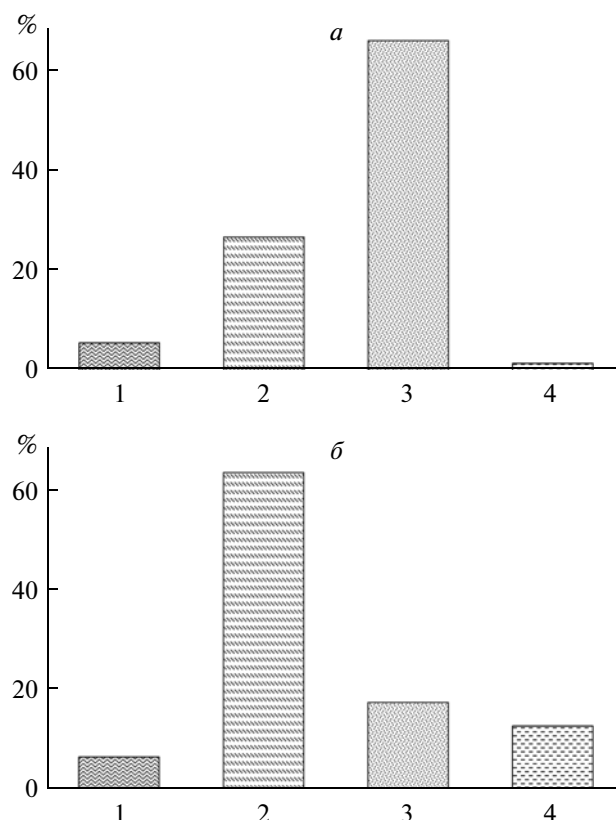


Рис. 5. Относительные площади болотных микроландшафтов в типичной (а) и южной (б) тундровых подзонах Западной Сибири (% площади болот подзоны). Болотные микроландшафты: 1 — бугры и валики; 2 — обводненная мочажина; 3 — мочажина; 4 — внутриболотные озерки.

дований. Выделены 24 класса микроландшафтов для типичной тундры и 19 классов — для южной тундры. Следует отметить, что использование результатов наземных исследований территории, отображенной на космическом снимке, значительно повышает точность дешифрирования снимка.

Проведенное исследование показало, что болотные и озерные экосистемы в типичной тундре Западной Сибири занимают около 63% территории. Доля указанных экосистем в южной тундре составляет 46%. Из полученных оценок заболоченности территорий изучаемых районов следует, что болотные массивы занимают несколько большие площади по сравнению с площадями, указанными на типологической карте болот Западной Сибири.

Согласно проведенным расчетам, значительную часть (78–94%) территории болот тундровой зоны Западной Сибири занимают мочажинные микроландшафты. Бугры и валики на болотах рассматриваемой зоны занимают 5–8% площади.

Озерки наиболее распространены в болотных экосистемах южной тундры.

Полученные результаты демонстрируют возможность совместного использования космических снимков со спутников среднего и сверхвысокого разрешения для анализа сложной, мозаичной структуры природных ландшафтов больших регионов.

Полученные оценки площадей болотных микроландшафтов тундровой зоны могут быть использованы, например, в таких задачах, как моделирование региональной эмиссии парниковых газов из природных экосистем по экспериментальным данным о потоках этих газов в атмосферу из отдельных микроландшафтов, оценка продуктивности растительного покрова разных типов болот на основе экспериментальных данных о продуктивности растительности болотных микроландшафтов.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект 14-05-00193а) и Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН “Процессы в атмосфере и криосфере как фактор изменений природной среды”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брыксина Н.А., Кирпотин С.Н.* Ландшафтно-космический анализ изменения площади и количества термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2012. № 4(20). С. 185–194.
- Варламова Е.В., Соловьев В.С.* Исследование динамики индекса растительности арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2012. Т. 9(1). С. 65–70.
- Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Взаимосвязь вегетационного индекса с климатическими параметрами и структурными характеристиками растительного покрова // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 524–538.
- Елсаков В.В.* Использование материалов спутниковых съемок для анализа значений хлорофилльного индекса тундровых фитоценозов // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 60–70.
- Казанцев В.С.* Эмиссия метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2013. 137 с.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
- Корниенко С.Г., Якубсон К.И.* Исследование трансформации растительности в районах Тазовского полуострова по данным космической съемки // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 46–57.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г.* Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 16–26.
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукса З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и Ко, 2001. 584 с.
- Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 508 с.
- Наумов А.В.* Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
- Павлов А.В.* Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Акад. изд-во “Гео”, 2008. 229 с.
- Покровский О. М.* Применение данных дистанционного зондирования температуры поверхности океана, ледового покрова и атмосферы в Арктике для изучения тенденций изменения климата России // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 20–33.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 3–10.
- Романова Е.А., Быбина Р.Т., Голицына Е.Ф., Иванова Г.М., Усова Л.И., Трушников Л.Г.* Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. Масштаб 1 : 2500000. Л.: ГУГК, 1977.
- Сайт ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных”, <http://www.meteo.ru>
- Тутубалина О.В.* Изучение сезонной динамики растительности Кольского полуострова по снимкам Terra MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 1. С. 59–67.
- Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.* Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments and a global estimate // Global Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. GB4009.
- Bindoff N.L., Stott P.A., AchutaRao K.M., Allen M.R., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I.I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X.* Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional // Clim. Change 2013: The Phys. Sci. Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and N.Y., USA: Cambr. Univ. Press, 2013. P. 867–952.
- Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M.* Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility // Clim. Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and N.Y., USA: Cambr. Univ. Press, 2013. P. 1029–1136.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W.* Remote sensing and image interpretation. N.Y.: Wiley, 2004. 763 p.

McGuire A.D., Anderson L.G., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D.J., Heimann M., Lorenson T.D., Macdonald R.W., Roulet N. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecol. Monogr.* 2009. V. 79(4). P. 523–555.

Olthof I., Pouliot D. Treeline vegetation composition and change in Canada's Western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling // *Rem. Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 805–815.

Raynolds M., Comiso J.C., Walker D.A., Verbyla D. Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI // *Rem. Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 1884–1894.

Richards J.A., Jia X. Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 439 p.

Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. G04002, doi:10.1029/2005JG000150.

Analysis of Landscape Structure in the Tundra Zone for Western Siberia Based on Satellite Data

L. L. Golubyatnikov¹, E. A. Zarov², V. S. Kazantsev¹, I. V. Filippov², G. O. Gavrilov³

¹*Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*Yugra State University, Khanty-Mansiysk*

³*Moscow State University, Moscow*

The landscape structure are investigated for typical and southern tundra subzones of Western Siberia based on satellite images from Landsat and WorldView. Types of the microlandscape types for the considered regions are selected and areas of microlandscapes are defined on the basis of satellite information and accounting data of field studies. Area of the main wetland landscapes in the different types of bogs in the North of Western Siberia are defined.

Keywords: tundra zone, Western Siberia, landscape, microlandscape, satellite images