

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА В ТУНДРАХ КОЛЫМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ (ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ)

А.А. Веремеева, Н.В. Глушкова^{*,**}

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, г. Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия; averemeeva@gmail.com*

**Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия*

***Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия; hope@igm.nsc.ru*

Рассмотрен процесс формирования рельефа тундровой зоны Колымской низменности по данным космической съемки с использованием ГИС-технологий. Составлена схема распространения четвертичных отложений на основе дешифрирования космических снимков Landsat. Установлено, что отложения ледового комплекса, слагающие останцовые возвышенности (едомы), сохранились на 16 % площади тундровой зоны Колымской низменности, в то время как на карте четвертичных отложений (масштаба 1:1 000 000) территории, сложенные ледовым комплексом, занимают 40 %. Построена схема глубин расчленения рельефа, характеризующая мощность отложений ледового комплекса. Выявлены морфологические типы едом. Установлены закономерности формирования рельефа в голоцене. По соотношению удельной площади едом и озер выделены восемь типов рельефа и дана их характеристика.

Ледовый комплекс, термокарст, рельеф, голоцен, космические снимки, ГИС-технологии, Колымская низменность

RELIEF FORMATION IN THE REGIONS OF THE ICE COMPLEX DEPOSIT OCCURRENCE: REMOTE SENSING AND GIS-STUDIES IN THE KOLYMA LOWLAND TUNDRA

A.A. Veremeeva, N.V. Glushkova^{*,**}

*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS,
142290, Pushchino, Moscow region, Institutskaya str., 2, Russia; averemeeva@gmail.com*

** Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 630090, Novosibirsk, pr. Akad. Koptuyuga, 3, Russia*

*** Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2, Russia; hope@igm.nsc.ru*

The study of the relief of Kolyma lowland tundra, using remote sensing data and GIS technologies, has been carried out. The scheme of the Quaternary deposits based on Landsat images has been constructed. It has been determined that Ice Complex deposits that form positive relief forms (yedoma) occupy 16 % of the Kolyma lowland tundra area. This data is in sharp contrast to earlier estimations as the geological map of Quaternary deposits of the scale 1:1 000 000 shows 40 % Ice Complex deposit area. The scheme of vertical dissection of the relief in this area has been constructed. The morphological types of the yedoma have been revealed. The regularities of the relief formation in Holocene have been determined. The 8 relief types from the ratio of the Ice Complex deposit areas and thermokarst lake areas have been established and characterized.

Ice Complex, thermokarst, relief, Holocene, satellite images, GIS-studies, Kolyma lowland

ВВЕДЕНИЕ

На приморских низменностях Якутии распространены позднелеистоценовые отложения ледового комплекса (ЛК), представляющие собой высокольдистые пылеватые суглинки с мощными полигонально-жильными льдами. Отложения ЛК слагают положительные формы рельефа – едомы. Они распространены также на низменностях Центральной Якутии и в меньшей степени на территории Таймырского и Чукотского автономных округов [Томирдиаро, 1980; Grosse et al., 2013]. Актуальность исследования подобных районов рас-

тет в связи с необходимостью оценки влияния современных изменений климата на динамику криолитозоны [Зольников и др., 2004; Григорьев и др., 2009; Конищев, 2011; Romanovsky et al., 2010]. Изучение районов распространения ЛК важно также для оценки содержания органического вещества и прогнозирования эмиссии парниковых газов в случае протаивания мерзлых пород [Губин, Веремеева, 2010; Шмелев и др., 2013; Grosse et al., 2013; Strauss et al., 2013]. Так, среднегодовая температура воздуха в районе пос. Черский с 1970 по 2010 г.

повысилась с -12 до -9 °С, а температура пород на глубине 15 м увеличилась с -10.5 до -9 °С [Romanovsky et al., 2010].

Изменение площади термокарстовых озер, характерных для районов распространения ЛК, может рассматриваться как важный индикационный признак реакции ландшафтов на климатические изменения [Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2011; Тарасенко и др., 2013; Vereteeva, Gubin, 2009]. Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) охватывают последние 50 лет, поэтому остается нерешенным вопрос, являются наблюдаемые тенденции откликом на современные изменения климата или нет. Для понимания закономерностей изменения площади термокарстовых озер на современном этапе необходимо представление об истории развития термокарстовых процессов в голоцене. Активные исследования четвертичных отложений и рельефа приморских низменностей Якутии ведутся с конца 1950-х гг. [Баранова, 1957; Катасонов, Бискэ, 1959]. Однако четвертичные отложения большей части территории показаны лишь на карте масштаба 1:1 000 000 [Государственная... карта..., 2000a], так как геологические карты масштаба 1:200 000 покрывают только участки выходов скальных пород. Использование мультиспектральных космических снимков позволяет уточнить границы различных типов четвертичных отложений и провести анализ закономерностей их распространения. Подобные исследования выполнены лишь на небольших по площади участках Лено-Анабарской низменности [Grosse et al., 2006] и дельты Лены [Grosse et al., 2005; Morgenstern et al., 2011, 2013].

Цель настоящей работы – выявление закономерностей формирования рельефа районов распространения отложений ЛК в голоцене.

Особенности геологического строения и рельефа тундровой зоны Колымской низменности

Исследования рельефа проводились в тундровой зоне Колымской низменности, в пределах Алазее-Колымской озерно-термокарстовой ландшафтной провинции, относящейся к группе тундровых провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород [Федоров, 1991]. С востока территория ограничена Халлерчинской тундрой, сложенной песчаными отложениями [Спектор, 1980], с запада – цепочкой скальных гряд Кряжа Суор-Уята и левобережья р. Алазея (рис. 1). Южная граница тундры проведена по космическим снимкам Landsat 5 TM и 7 ETM+ с разрешением 30 м на основе разницы спектральных характеристик безлесных и залесенных территорий (см. рис. 1).

Площадь тундровой зоны Колымской низменности, исключая Халлерчинскую тундру, около 45 тыс. км². Она расположена в области устойчивого прогибания с олигоцен-неоплейстоценового времени, что обусловило накопление толщи рыхлых отложений мощностью до 500 м [Архангелов, 1977; Баландин, 1980]. Представление о стратиграфии рыхлого чехла сформировано на основе изучения опорных обнажений в среднем и нижнем течении р. Бол. Чукочьа, долине р. Коньковая, среднем течении р. Алазея [Шер, 1971; Архангелов, 1977; Архангелов и др., 1979; Каплина, 1981; Каплина и др., 1981; Решения..., 1987] и буровых скважин [Ривкина и др., 2006].

Верхняя часть толщи – это преимущественно позднелайстоценовый ЛК и сформированные в результате его оттаивания в голоцене отложения аласского комплекса. Ледовый комплекс представляет собой сингенетически промерзшие осадки (мощностью до 40–50 м) преимущественно алевритового состава, содержащие мощные полигонально-жильные льды и характеризующиеся высокой льдистостью – от 65 до 90 % [Романовский, 1961; Шер, 1971; Архангелов, 1977; Томирдиаро, 1980; Schirrmeyer et al., 2010]. Палеопедологические исследования толщи показали, что большая часть отложений ЛК переработана синлитогенным почвообразованием [Губин, 1994, 2002]. В конце плейстоцена в результате потепления климата высокольдистые отложения ЛК подверглись термокарстовым, термоденудационным и термоэрозионным процессам, что привело к их значительной переработке и формированию аласского комплекса [Романовский, 1961; Плахт, 1985; Каплина, 2009; Schirrmeyer et al., 2002; Morgenstern et al., 2013]. Радиоуглеродное датирование показало, что образование термокарстовых озер и оттаи-

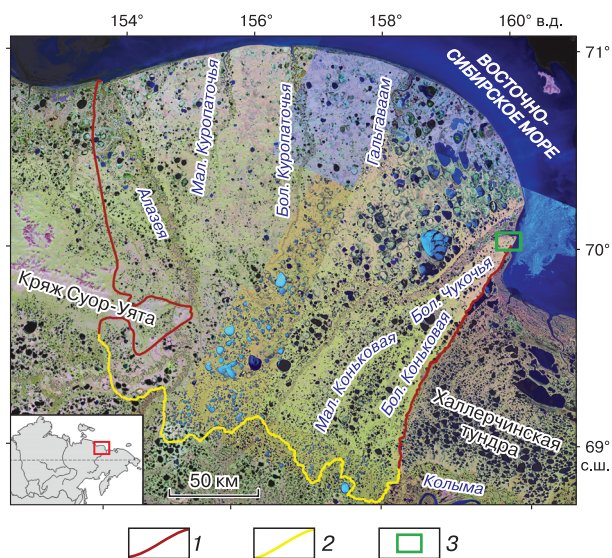


Рис. 1. Район исследований.

1 – тундровая зона Колымской низменности; 2 – южная граница тундры; 3 – район полевых исследований.

вание отложений ЛК (так называемая волна термокарста) произошло за короткий промежуток времени 13–12 тыс. лет назад [Каплина, 2009]. На большей части территории аласный рельеф был сформирован уже 11–10 тыс. лет назад [Каплина, Ложкин, 1979; Каплина, 2009]. Одновременно с возникновением и дальнейшим распространением термокарстовых озер формировалась гидросеть, частью которой они являются, развиваясь одновременно с ней [Лахтина, Корейша, 1978; Плахт, 1985].

Рельеф территории представляет собой низменную равнину. Отметки рельефа постепенно снижаются от 70–90 м на юге тундровой зоны Колымской низменности до 5–10 м на побережье Восточно-Сибирского моря. Выделяется несколько разновысотных уровней рельефа с разными характером и направленностью новейших тектонических движений. Это во многом определило степень переработки позднеплейстоценовых равнин термокарстовыми и термоэрозионными процессами в голоцене, характер заозеренности, типы речных долин и т. д. [Баранова, 1957; Катасонов, Бискэ, 1959; Лахтина, Корейша, 1978; Патык-Кара и др., 1982; Каплина и др., 1986; Государственная... карта..., 2006].

Использование данных космической съемки и ГИС-технологий

Составление схемы распространения четвертичных отложений. Особенностью рельефа районов распространения отложений ЛК является высокая степень расчлененности термокарстовыми и термоэрозионными процессами. Превышение поверхностей едом над днищами аласов составляет в среднем 20–25 м. Детальность имеющихся топокарт не достаточна для подобного анализа, поэто-

му для картографирования рельефообразующих четвертичных отложений необходимо использование космических снимков среднего и высокого разрешения и топографических карт масштабов 1:100 000 и 1:200 000. Повсеместное развитие криогенных процессов, приводящих к возникновению дренированных поверхностей в пределах аласов и заболоченных участков на едомах, затрудняет применение автоматизированной классификации по космическим снимкам. Поэтому для выделения позднеплейстоценовых останцовых поверхностей и озерно-термокарстовых котловин дешифрирование космических снимков проводилось вручную.

Полевое дешифрирование космических снимков проводилось авторами в низовьях р. Бол. Чукочья в августе 2009 г. Для картографирования четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности использовались космические снимки Landsat TM 5 и 7 ETM+ летнего периода:

- 1) Landsat – 5, 27.07.09 (LT51080112009208GLC00);
- 2) Landsat – 5, 20.08.10 (LT51110102010232MGR00);
- 3) Landsat – 5, 12.08.09 (LT51080102009224GLC00);
- 4) Landsat – 7, 04.07.01 (LE71090112001185EDC00);
- 5) Landsat – 7, 03.08.01 (LE71110112001215EDC00).

Снимки имеют уровень привязки L1T (с радиометрической, геометрической коррекцией, ортотрансформированные с помощью цифровой модели рельефа (ЦМР) и сети опорных точек). Точность привязки космических снимков соответствует масштабу 1:200 000–1:500 000 [Tucker et al., 2004]. Использовалась поперечно-цилиндрическая проекция, центральный меридиан 157° в.д., система позиционирования WGS 84.

При дешифрировании космических снимков применен вариант цветового синтеза из коротко-

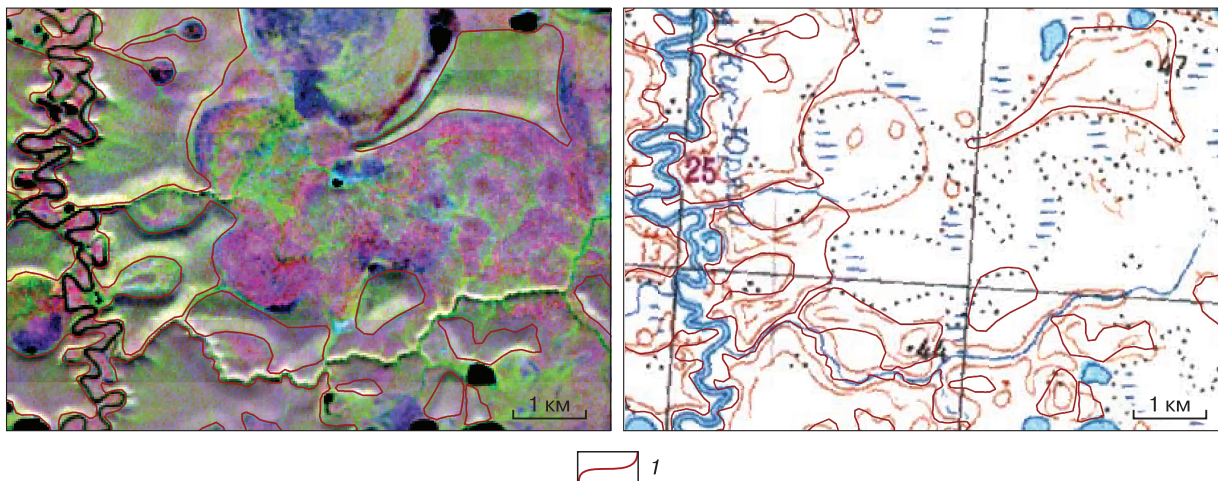


Рис. 2. Выделение поверхности едомы по космическим снимкам Landsat с использованием топокарты м-ба 1:200 000.

1 – границы едом, сложенных отложениями ЛК.

волновой инфракрасной, ближней инфракрасной и красной зон (RGB 543). Поверхность едомы выделена по менее зернистому сочетанию оттенков зеленого, желтого и розового цветов на более дренированных участках, характеризующихся кустарничково-зеленомошной тундрой (рис. 2).

Заболоченные поверхности отличаются более зернистым рисунком и преобладанием более темных розово-фиолетовых оттенков. Таким образом, при картографировании площади четвертичных отложений использовались спектральные характеристики космических снимков, отражающие особенности растительного покрова, подстилающей поверхности и морфологических черт рельефа, а также высотные данные топографических карт масштаба 1:200 000 и построенной по ним ЦМР, покрывающей большую часть исследуемой территории. Учитывались границы контуров четвертичных отложений карты масштаба 1:1 000 000 [Государственная... карта..., 2000a]. Рабочий масштаб картографирования 1:30 000. В таком масштабе аллювиальные отложения в пределах едом выделялись в речных долинах шириной более 50 м. В аласах картографирование аллювиальных отложений проводилось для наиболее крупных постоянных водотоков шириной более 100 м. Картографируемые четвертичные отложения представлены шестью типами: ледовый комплекс, аласный комплекс, аллювиальные, аллювиально-морские, морские и выходы скальных пород.

Выделение типов рельефа и их характеристики. Авторы разработали оригинальную методику анализа рельефа на основе подхода, созданного для картографирования и мониторинга гетероген-

ных природно-территориальных комплексов с использованием ДДЗЗ [Зольников и др., 2010, 2011]. Особенности развития термокарста в голоцене в районах распространения ЛК отражают такие параметры, как удельная площадь едом и озер, глубина расчленения рельефа и морфология едом.

По выделенным контурам едом и озер составлены схемы их удельной площади. Для построения схемы удельной площади озер (заозеренности) было проведено дешифрирование указанных космических снимков путем автоматизированной классификации методом спектрального угла. Схемы удельной площади едом и озер создавались путем построения плотностных сеток (радиус скользящего окна 5 км, шаг сетки 30 м). На построенных сетках было выделено по три класса значений. Выбор порогов для этих классов основан на анализе статистического распределения плотностных характеристик (резкие перепады значений на гистограммах плотностных сеток). Для плотностной сетки удельной площади едомы выделены следующие классы: 0–5, 5–28 и более 28 % (рис. 3, а). Показатель отражает отношение площади, занимаемой едомой, к площади всей исследуемой территории, далее этот показатель называется *едомность*.

Для плотностной сетки заозеренности выделены следующие классы: 0–4, 4–29 и более 29 % (см. рис. 3, б). В результате пересечения сеток плотности едом и озер по указанным классам получено девять типов соотношений едомности и заозеренности (табл. 1).

По преобладающему по площади классу или сочетанию классов выделено восемь типов релье-

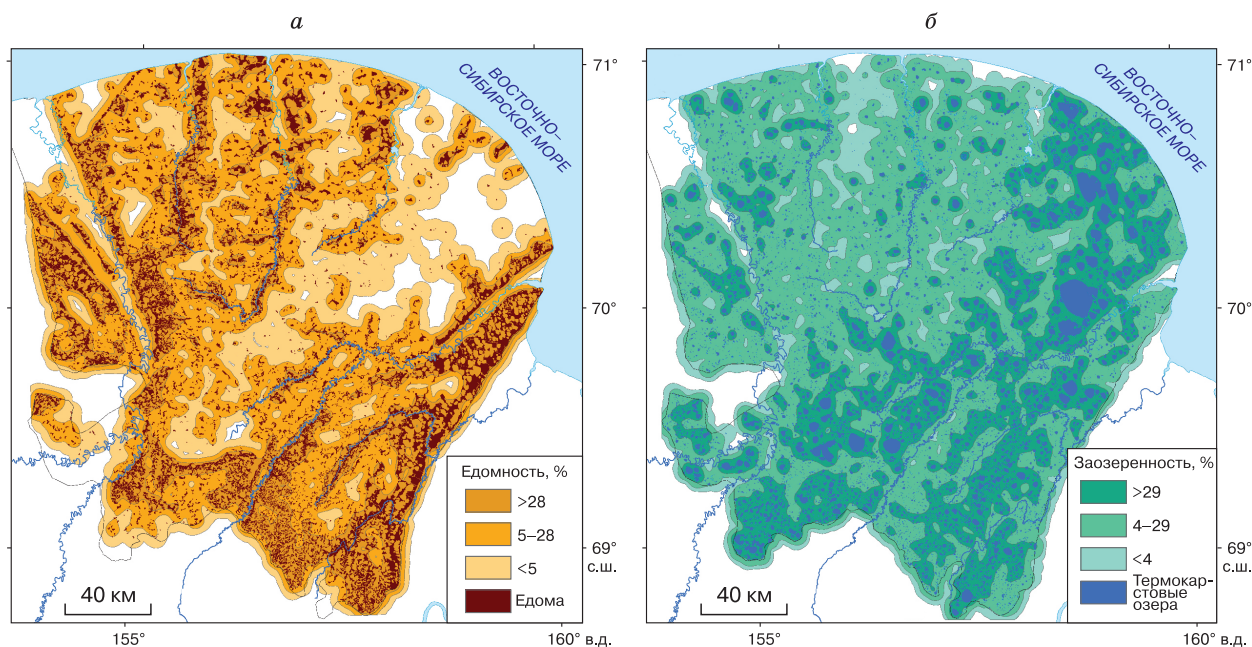


Рис. 3. Схемы едомности (а) и заозеренности (б).

фа. Проведен анализ распространения типов рельефа в сравнении с ЦМР и построенной по ней схемой средних уклонов поверхности. Составлена схема глубин расчленения рельефа на основе разницы абсолютных отметок высот поверхности едомы и урезов воды термокарстовых озер и дниц аласов, взятых с топографической карты масштаба 1:200 000.

Предварительная обработка космических снимков и автоматизированная классификация для выделения акваторий озер выполнены в программном пакете ENVI 4.8. Для картографирования площади четвертичных отложений, построения схем удельной плотности едом и озер и проведения операций наложения слоев использовался программный пакет ArcGIS 9.3.

Распространение четвертичных отложений в тундровой зоне Колымской низменности

Составлена схема распространения четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности с использованием космических снимков Landsat (рис. 4). Установлено, что позднеплейстоценовые останцы сохранились лишь на 16 % территории, аласы занимают 72 % (табл. 2, рис. 4, а). Сопоставление площади четвертичных отложений, выделенных авторами на основе дешифрирования космоснимков, с данными геологической карты масштаба 1:1 000 000 показало, что площадь отложений ЛК на карте завышена в 2.5 раза (см. табл. 2, рис. 4).

Таблица 1. Классы, полученные в результате пересечения плотностных сеток едомы и термокарстовых озер (см. рис. 5)

Едомность	Заозеренность		
	Высокая (>29 %)	Средняя (4–29 %)	Низкая (<4 %)
Высокая (>28 %)			
Средняя (5–28 %)			
Низкая (<5 %)			

Таблица 2. Площади четвертичных отложений, выделенных по космическим снимкам Landsat и данным карты м-ба 1:1 000 000

Тип четвертичных отложений	Площадь отложений по снимкам Landsat		Площадь отложений по карте м-ба 1:1 000 000	
	км ²	%	км ²	%
Ледовый комплекс	6923	16	17 976	40
Аласный комплекс	32 175	72	21 138	48
Аллювиальные	4151	9	3742	8
Аллювиально-морские	680	2	1089	2
Морские	476	1	431	1
Выходы скальных пород	0	0	32	0
Вся площадь	44 406	100	44 406	100

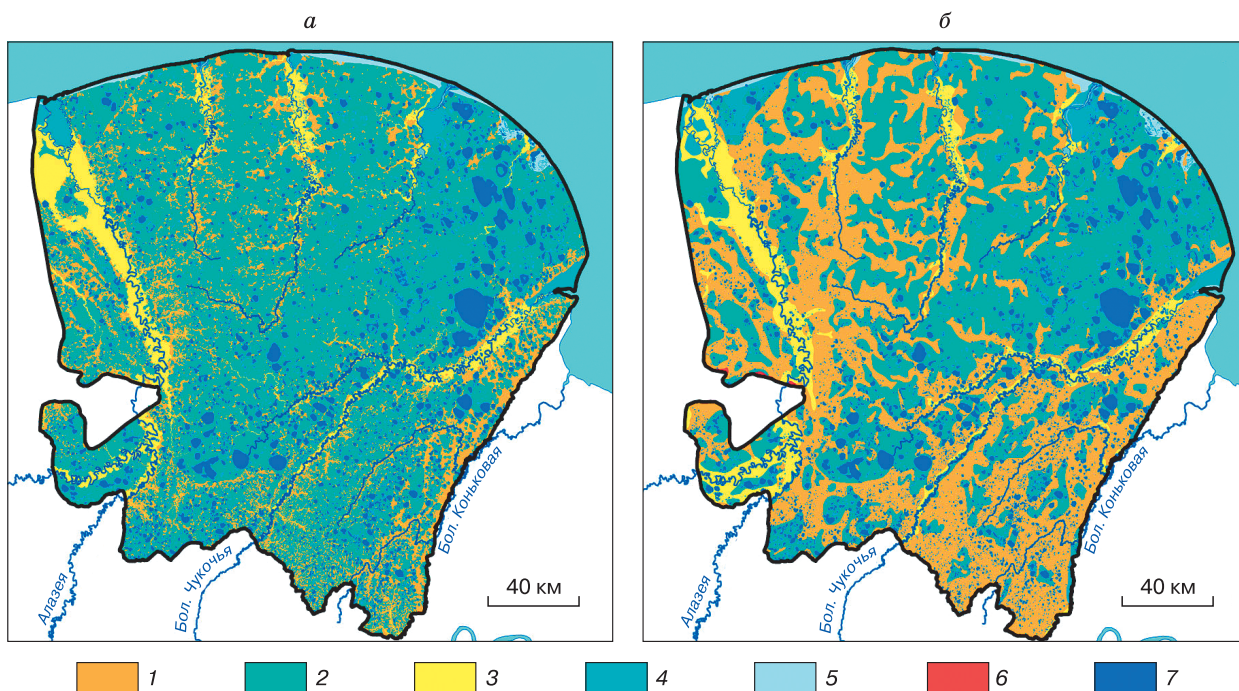


Рис. 4. Сопоставление выделенных четвертичных отложений по снимкам Landsat (а) и по карте четвертичных отложений м-ба 1:1 000 000 (б) [Государственная... карта..., 2000а].

1 – отложения ледового комплекса; 2 – отложения аласного комплекса; 3 – аллювиальные отложения; 4 – аллювиально-морские отложения; 5 – морские отложения; 6 – выходы скальных пород; 7 – термокарстовые озера.

В других районах приморских низменностей Якутии отложения ЛК занимают: на Яно-Индигирской низменности на п-ове Буор-Хая – 15 % [Günther et al., 2013] и п-ове Широкостан – 42 % [Тарасенко и др., 2013], на Лено-Анабарской низменности – 22 % [Grosse et al., 2006], на Быковском п-ове – около 50 % [Grosse et al., 2005], в районе дельты Лены – 34 % [Morgenstern et al., 2011] от всей площади. Таким образом, отложения ЛК большей части приморских низменностей Якутии в значительной степени переработаны термокарстом.

Средняя заозеренность тундровой зоны Колымской низменности составляет 13.5 %. На других участках распространения отложений ЛК озера занимают 14.4 % всей площади на Быковском п-ове [Grosse et al., 2005], 9–15 % в северной части Анабаро-Оленекского междуречья [Романенко, 1997; Grosse et al., 2006], 13.3 % в районе дельты Лены [Morgenstern et al., 2011]. Большая часть озер к настоящему времени спущена, озера существуют преимущественно в уже сформированных аласах. Сопоставимость значений заозеренности разных участков приморских низменностей Якутии указывает на схожесть условий, влияющих на развитие гидросети.

Анализ распространения отложений ЛК и гидросети показал, что наиболее значительная площадь едом сохранилась в долинах крупных рек и их притоков, а также на участках, прилегающих к уступам в рельефе с перепадами высот 20–30 м (см. рис. 4, а). Это низовья р. Алазея, междуречье Алазеи и Бол. Чукочьей в их среднем течении, правобережье низовьев р. Бол. Чукочьей и междуречье Мал. Коньковой и Бол. Коньковой. Наибольшая степень переработки термокарстом отложений ЛК характерна для низких геоморфологических уровней междуречий Бол. Чукочьей,

Гальгаваам и Бол. Куропаточьей, а также Бол. Чукочьей и Алазеи в среднем их течении (см. рис. 4, а). В подобных районах большую часть тер-

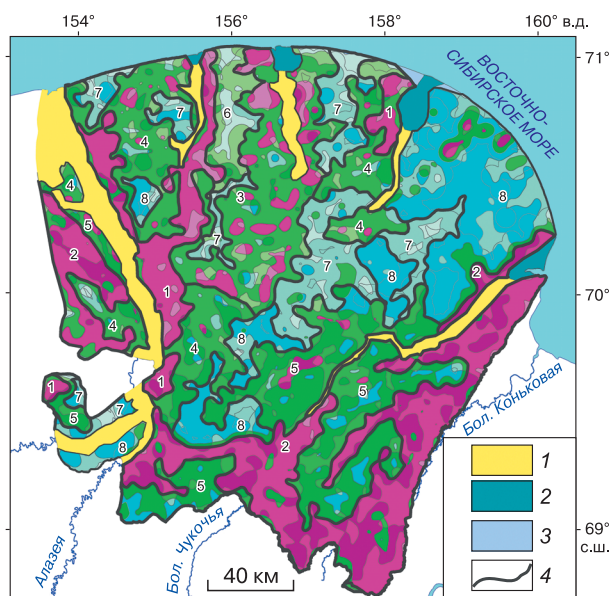


Рис. 5. Типы рельефа по соотношению площадей едом и озер на основе пересечения плотностных схем едом и озер (см. табл. 1, рис. 3):

1 – высокая едомность, средняя заозеренность; 2 – сочетание высокой едомности, высокой и средней заозеренности; 3 – сочетание участков высокой едомности и заозеренности и средней едомности и заозеренности; 4 – средняя едомность, средняя заозеренность; 5 – средняя едомность, высокая заозеренность; 6 – средняя и низкая едомность, низкая заозеренность; 7 – низкая едомность, средняя заозеренность; 8 – низкая едомность, высокая заозеренность. Границы контуров долин рек (1), дельт (2) и маршей (3) взяты с карты четвертичных отложений масштаба 1:1 000 000 [Государственная... карта..., 2000а]; 4 – границы типов рельефа.

Таблица 3. Характеристика типов рельефа по преобладающему сочетанию удельной площади едом и озер

Но-мер	Тип рельефа	Удельная площадь, %	Абс. высота, м	Сред. уклон, град	Глубина расчленения рельефа, м	Морфотип едом
1	Высокая едомность, средняя заозеренность	7	20–50	5–6	20–40	Массивно-останцовая, массивная
2	Высокая едомность, высокая и средняя заозеренность	20	30–60	5–6	20–50	Массивная, холмисто-останцовая
3	Сочетание участков высокой едомности и заозеренности и средней едомности и заозеренности	9	10–30	3–5	20–40	Разреженная массивно-останцовая
4	Средняя едомность, средняя заозеренность	7	10–35	2–3	10–30	Разреженная массивно-останцовая, островная
5	Средняя едомность, высокая заозеренность	19	20–50	2–4	10–40	Островная
6	Средняя и низкая едомность, низкая заозеренность	2	10–30	0–2	10–20	»
7	Низкая едомность, средняя заозеренность	11	10–25	1–2	10–30	»
8	Низкая едомность, высокая заозеренность	17	0–20	0–1	10–40	»

ритории занимают слившиеся озерно-термокарстовые котловины с единичными останцами едом.

Характеристика рельефа и закономерности развития термокарста в голоцене

Выделено восемь типов рельефа по соотношению едомности и заозеренности (рис. 5, табл. 3). Аласы преобладают во всех типах рельефа, но их удельная площадь и степень заозеренности различаются.

Высокая заозеренность более характерна для южной части территории, совпадающей примерно с границами подзоны южных тундр. Районы с высокой едомностью (более 28 %) отличаются высокой или средней заозеренностью (более 29 и 4–29 % соответственно). Для районов с высокой едомностью в низовьях рек Алазея и Бол. Чукочья характерна террасированность берегов озерных котловин и наличие байджежахов едомного берега

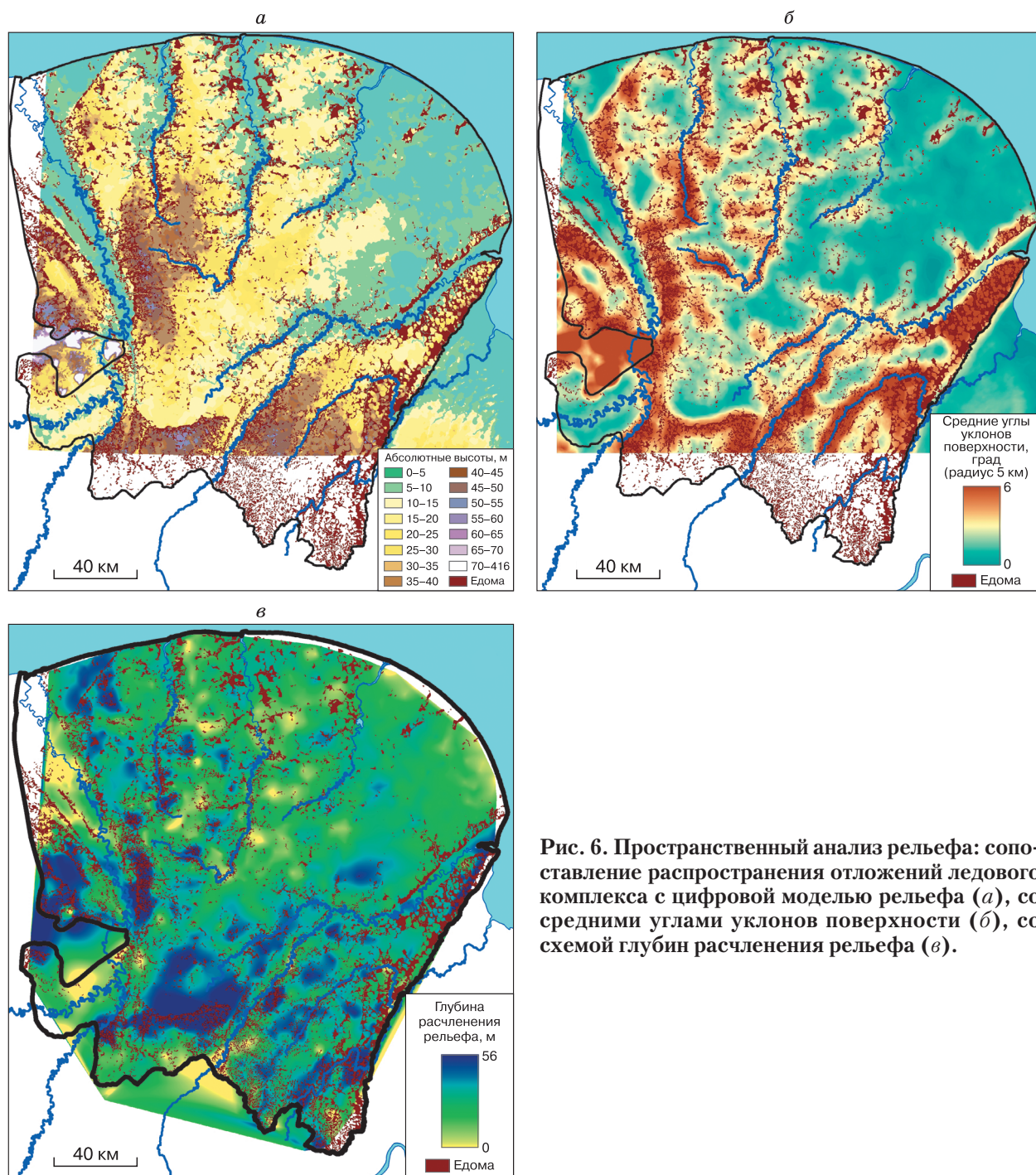


Рис. 6. Пространственный анализ рельефа: сопоставление распространения отложений ледового комплекса с цифровой моделью рельефа (а), со средними углами уклонов поверхности (б), со схемой глубин расчленения рельефа (в).

большой части озер. Это говорит о постепенном перемещении озер и указывает на тектоническое поднятие территории на протяжении голоцена [Применение..., 1970].

Территории с высокой и средней едомностью (более 28 и 5–28 % соответственно) занимают более половины тундровой зоны Колымской низменности. Значительную площадь территории занимают аласные равнины, где едомы составляют менее 5 %, а озера – более 29 % всей площади (см. рис. 5).

Выделяются малоозерные аласные равнины с низкой едомностью и низкой или средней заозерностью. Спуск озер на таких участках, по-видимому, указывает на тектоническое поднятие этих территорий, происшедшее одновременно с понижением базиса эрозии после раннеголоценовой трансгрессии [Государственная... карта..., 2000а, б].

Районы с низкой едомностью, характерные для участков с малыми абсолютными высотами, встречаются и на высоких геоморфологических уровнях, например в верховьях рек Мал. Куропаточья и Бол. Куропаточья (рис. 6, а). В работе Т.Н. Каплиной с соавт. [1986] сделан вывод, что наибольшая сохранность едом соответствует вершинным поверхностям выделенных ими куполов и валов едомы. Однако из сопоставления распространения отложений ЛК и ЦМР следует, что это соблюдается не всегда.

Сравнение схемы распространения типов рельефа со схемой средних уклонов поверхности, полученной по ЦМР, показало, что степень сохранения едомы хорошо коррелирует с величиной средних углов уклонов поверхности. Так, районы с высокой едомностью характеризуются наибольшими средними уклонами 4–6° (см. рис. 6, б) и со-

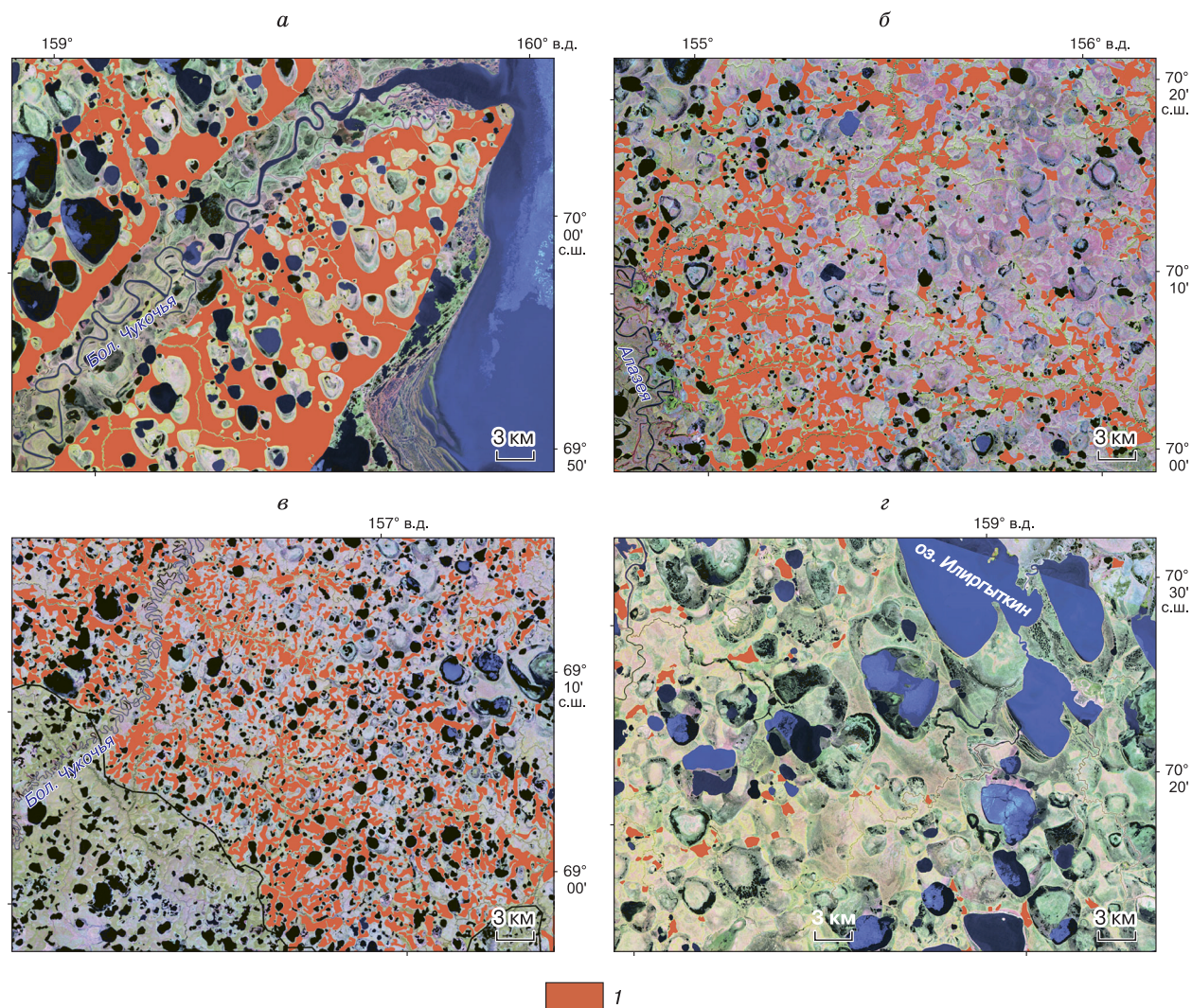


Рис. 7. Основные морфологические типы едом:

а – массивный, б – массивно-останцовый и разреженный массивно-останцовый, в – холмисто-останцовый, г – островной.
1 – поверхность едомы.

ответствуют участкам склонов поднятий, в том числе тектонически активных на современном этапе [Государственная... карта..., 2000б].

Глубина расчленения рельефа зависит от мощности отложений ЛК [Каплина и др., 1986], поэтому данный показатель может использоваться для выявления современной мощности отложений ЛК с учетом того, что средняя мощность сохранившихся отложений ЛК под аласным комплексом 2 м [Шмелев и др., 2013]. Средние глубины расчленения рельефа, согласно разработанной схеме, составляют 20–25 м, что соответствует литературным данным [Архангелов и др., 1979; Каплина и др., 1981]. Т.Н. Каплина с соавторами [1986] отмечают закономерность убывания глубин расчленения едомы аласами с понижением абсолютных отметок и объясняют это уменьшением мощности ЛК с уменьшением высоты поверхности. Однако пространственное распространение отложений ЛК подтверждает мнение об их покровном характере [Томирдиаро, 1980]. Так, районы с максимальными глубинами расчленения рельефа приурочены к депрессиям, где едома сохранилась в виде останцов (см. рис. 6, а, в). В то время как в районах более высоких участков равнины глубины термокарстового расчленения снижаются, и это, вероятно, говорит о том, что мощность отложений ЛК здесь изначально была меньше. На участке между речья Гальгаваам и Бол. Чукочьей в результате практически полного оттаивания отложений ЛК рельеф имеет небольшие глубины расчленения (0–15 м).

Морфология едом является важным показателем особенностей развития рельефа в голоцене. Выделено пять морфологических типов едом (рис. 7). К районам с высокой едомностью относятся массивный, массивно-останцовый и холмисто-останцовый типы. Массивный и массивно-останцовый типы едомы характерны для участков с наибольшими значениями средних уклонов поверхности (4–6°) и маркируют территории, испытывающие на современном этапе поднятие (рис. 8). Холмисто-останцовый тип распространен на юге тундровой зоны, таким же морфотипом характеризуются едомы прилегающей зоны тайги. Граница леса достигала в раннем голоцене (9.5–8.0 тыс. лет назад) современной береговой линии [Ложкин и др., 1975; Каплина, 2009], а в среднем–позднем голоцене, по-видимому, существовала на современной территории зоны южных тундр. То есть границы распространения холмисто-останцового морфотипа вероятнее всего указывают на положение северного предела леса в среднем и позднем голоцене (см. рис. 8). Участки со средней степенью сохранности едом характеризуются разреженным массивно-останцовым морфотипом едом, соответствующим участкам со средними значениями уклонов поверхности (2–4°). На рав-

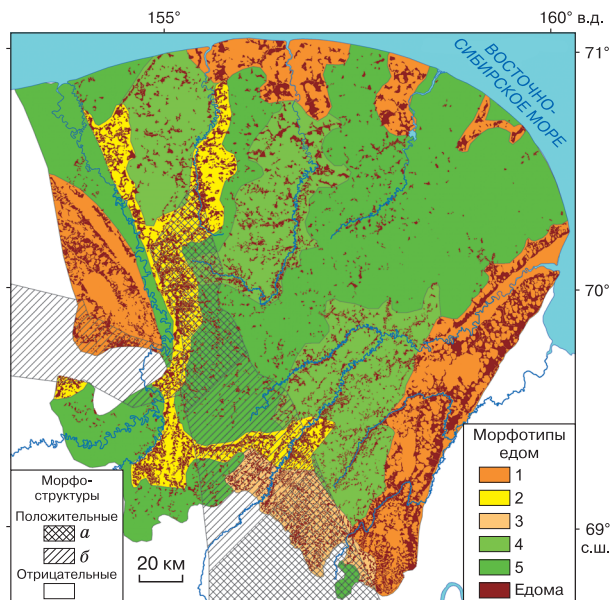


Рис. 8. Распространение морфотипов едом и морфоструктур [Государственная... карта..., 2000б].

Морфотипы едом: 1 – массивный, 2 – массивно-останцовый, 3 – холмисто-останцовый, 4 – разреженный массивно-останцовый, 5 – островной. Морфоструктуры положительные (а – активно-поднимающиеся на современном этапе, б – отстающие) и отрицательные.

нинных участках с низкой едомностью, средней и высокой заозеренностью распространен островной морфотип.

Таким образом, выделенные типы рельефа по соотношению едомности и заозеренности характеризуются разными значениями абсолютных высот, средних уклонов, глубин расчленения рельефа и морфотипами едом (см. табл. 3), что отражает особенности формирования рельефа в голоцене.

ВЫВОДЫ

Использование космических снимков Landsat для картографирования четвертичных отложений в районах распространения ЛК и разработанная авторами методика на основе применения ГИС-технологий позволили выполнить детальную оценку площадей различных типов четвертичных отложений и всесторонний анализ рельефа.

Впервые составлена схема четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности с использованием космических снимков Landsat. Установлено, что едомы, сложенные отложениями ЛК, в значительной степени переработаны термокарстовыми и термоэрозионными процессами в голоцене и сохранились лишь на 16 % территории, аласы занимают 72 %. Сопоставление с данными геологической карты масштаба

1:1 000 000 показало, что площадь распространения отложений ЛК на карте завышена в 2.5 раза. Выявлено, что наибольшая площадь едом сохранилась на территориях, испытывающих тектоническое поднятие на современном этапе и характеризующихся наименее благоприятными для развития термокарста условиями: наибольшими значениями средних уклонов поверхности (4–6°) и относительными превышениями абсолютных высот, а также развитой гидросетью.

Средняя заозеренность тундровой зоны Колымской низменности составляет 13.5 %. Большинство озер существует в уже сформированных аласах. Большая часть сформированных в раннем голоцене озер к настоящему времени спущена, преобладают остаточные озера аласов. Близкие значения заозеренности разных участков приморских низменностей Якутии говорят о схожести условий, влияющих на развитие гидросети.

Выделено восемь типов рельефа по соотношению едомности и заозеренности, отражающих особенности формирования рельефа в голоцене, и дана их характеристика. Аласы преобладают во всех типах рельефа, но показатели их удельной площади и степени заозеренности различаются. Малоозерные аласные равнины с низкой едомностью указывают на тектоническое поднятие этих территорий, происходившее на фоне понижения базиса эрозии после раннеголоценовой трансгрессии. Низкая едомность и высокая заозеренность, характерные для участков с низкими абсолютными высотами, отмечены и на более высоких участках равнины, что не подтверждает вывод о том, что наибольшая сохранность едом соответствует вершинным поверхностям куполов и валов едомы [Каплина и др., 1986].

Выявлено, что средние глубины расчленения рельефа составляют 20–25 м. Районы с максимальными глубинами расчленения рельефа приурочены к депрессиям, где едома сохранилась в виде останцов. В районах более высоких участков территории глубины расчленения рельефа снижаются, и это, по-видимому, говорит о том, что мощность отложений ЛК здесь изначально была меньше. Таким образом, вывод Т.Н. Каплиной с соавт. [1986] о закономерности убывания глубин расчленения едомы аласами с понижением абсолютных отметок соблюдается не всегда.

Выделено пять морфологических типов едом. Массивный и массивно-останцовый морфотипы едом соответствуют участкам с высокими средними уклонами поверхности и территориям, испытывающим поднятие на современном этапе. Холмисто-останцовый морфотип едом, распространенный на юге исследуемой территории, вероятнее всего, указывает на положение зоны тайги в среднем и позднем голоцене. Островной морфотип соответствует участкам наиболее низких морфологических уровней.

Авторы выражают искреннюю благодарность С.В. Губину за организацию полевых исследований, Г. Гроссе за представленные материалы (ЦМР), И.Д. Зольникову за стажировку в Новосибирском ГИС-центре (ИГМ СО РАН), консультации по применению технологий ГИС и ДДЗЗ, рецензентам С.М. Фотиеву и Ф.А. Романенко, а также Е.А. Балдиной за ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-05-31368 мол_а).

Литература

Архангелов А.А. Подземное оледенение севера Колымской низменности // Проблемы криолитологии: Сб. ст. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, вып. VI, с. 26–58.

Архангелов А.А., Кузнецова Т.П., Карташова Г.Г. и др. Генезис и условия формирования верхнеплейстоценовых льдистых алевритов Колымской низменности (на примере Чукотского Яра) // Проблемы криолитологии: Сб. ст. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, вып. VIII, с. 110–135.

Баландин В.А. Комплексное изучение неотектоники закрытых территорий (на примере Яно-Колымской низменности) // Кайнозой Восточной Якутии: Сб. науч. тр. Якутск, Якут. фил. СО АН СССР, 1980, с. 131–137.

Баранов Ю.П. Геоморфологический очерк восточной части Колымской низменности // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Магадан, Кн. изд-во, 1957, вып. 11, с. 208–222.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных образований. М-6 1:1 000 000. Лист R-(55)-57 (Нижнеколымск). СПб., ВСЕГЕИ, 2000а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных образований. М-6 1:1 000 000. Лист R-(55)-57 (Нижнеколымск). Объяснит. зап. СПб., ВСЕГЕИ, 2000б, 163 с.

Григорьев М.Н., Куницкий В.В., Чжан Р.В. и др. Об изменении геокриологических, ландшафтных и гидрологических условий в арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата // География и природ. ресурсы, 2009, № 2, с. 5–11.

Губин С.В. Позднеплейстоценовое почвообразование на Приморских низменностях на севере Якутии // Почвоведение, 1994, № 8, с. 5–14.

Губин С.В. Педогенез – составная часть механизма формирования отложений позднеплейстоценового ледового комплекса // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 82–91.

Губин С.В., Веремева А.А. Органосодержащие почвообразующие породы Северо-Востока России // Почвоведение, 2010, № 11, с. 1334–1340.

Зольников И.Д., Глушкова Н.В., Лямина В.А. и др. Индикация динамики природно-территориальных комплексов юга Западной Сибири в связи с изменениями климата // География и природ. ресурсы, 2011, № 2, с. 155–160.

Зольников И.Д., Гуськов С.А., Мартысевич У.В. О вероятности формирования части четвертичных палеоврезов на севере Сибири термоэрозийными процессами // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 3, с. 3–10.

Зольников И.Д., Лямина В.А., Королюк А.Ю. Комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенного растительного покрова // География и природ. ресурсы, 2010, № 2, с. 126–131.

- Каплина Т.Н.** История мерзлых толщ северной Якутии в позднем кайнозое // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М., Наука, 1981, с. 153–181.
- Каплина Т.Н.** Аласные комплексы Северной Якутии // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 3–17.
- Каплина Т.Н., Костальдынина Н.К., Лейбман М.О.** Анализ рельефа низовьев р. Колымы в целях криолитологического картирования // Формирование мерзлых пород и прогноз криогенных процессов. М., Наука, 1986, с. 51–60.
- Каплина Т.Н., Лахтина О.В., Рыбакова Н.О.** Кайнозойские отложения среднего течения р. Алазеи (Колымская низменность) // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1981, № 8, с. 51–63.
- Каплина Т.Н., Ложкин А.В.** Возраст аласных отложений приморской низменности Якутии (радиоуглеродное обоснование) // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1979, № 2, с. 69–76.
- Катасонов Е.М., Бискэ С.Ф.** Проблемы геоморфологии Яно-Индигоирской и Колымской низменностей // Материалы второго геоморфологического совещания. М., Изд-во АН СССР, 1959, 16 с.
- Конищев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 15–18.
- 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.
- Кравцова В.И., Тарасенко Т.В.** Динамика термокарстовых озер Центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 3, с. 31–42.
- Лахтина О.В., Корейша М.М.** Ярусность аккумулятивного и криогенного рельефа Колымской низменности // Тр. ПНИИИС, 1978, вып. 54, с. 3–10.
- Ложкин А.В., Прохорова Т.П., Парий В.П.** Радиоуглеродные датировки и палинологическая характеристика отложений аласного комплекса Колымской низменности // Докл. АН СССР, 1975, т. 224, № 6, с. 1395–1398.
- Патък-Кара Н.Г., Гапон О.И., Гриненко О.В.** Структурно-геоморфологическое строение Колымской низменности // Геология кайнозоя Якутии. Якутск, Якут. фил. СО АН СССР, 1982, с. 70–77.
- Плахт И.Р.** Условия развития термокарста и этапы формирования аласного рельефа равнин Северо-Востока Евразии в позднем плейстоцене и голоцене // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое. М., Наука, 1985, с. 112–120.
- Применение** геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях / Гл. ред. И.П. Герасимов. М., Недра, 1970, 296 с.
- Решения** Межведомственного стратиграфического совещания по четвертичной системе Востока СССР. Объяснит. зап. к региональному стратиграфическим схемам четвертичных отложений Востока СССР. Магадан, СВКНИИ ДВО АН СССР, 1987, 241 с.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В. и др.** Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 23–41.
- Романенко Ф.А.** Формирование озерных котловин на равнинах Арктической Сибири: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1997, 25 с.
- Романовский Н.Н.** Эрозионно-термокарстовые котловины на севере приморских низменностей Якутии и Новосибирских островах // Мерзлотные исслед., 1961, вып. I, с. 124–144.
- Спектор В.Б.** Четвертичные отложения Приморской низменности (Халлерчинская тундра) // Кайнозой Восточной Якутии: Сб. науч. тр. Якутск, Якут. фил. СО АН СССР, 1980, с. 87–97.
- Тарасенко Т.В., Кравцова В.И., Пижанкова Е.И. и др.** Динамика термокарстовых озер приморской части Яно-Индигоирской низменности по дистанционным данным [Электронный ресурс] // Геокриологическое картографирование: Проблемы и перспективы: тез. конф. (Москва, 5–6 июня 2013 г.). М., МГУ, 2013, с. 135–138.
- Томирдиаро С.В.** Лёссово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене / С.В. Томирдиаро. М., Наука, 1980, 184 с.
- Федоров А.Н.** Мерзлотные ландшафты Якутии: методика и вопросы картографирования / А.Н. Федоров. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1991, 140 с.
- Шер А.В.** Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена Крайнего Северо-Востока СССР и Северной Америки / А.В. Шер. М., Наука, 1971, 310 с.
- Шмелев Д.Г., Краев Г.Н., Веремеева А.А., Ривкина Е.М.** Содержание углерода в мерзлых отложениях северо-востока Якутии // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 50–59.
- Grosse G., Schirrmeyer L., Kunitzky V. et al.** The use of CORONA images in remote sensing of periglacial geomorphology: An illustration from the NE Siberian coast // Permafrost and Periglacial Processes, 2005, vol. 16, p. 163–172.
- Grosse G., Schirrmeyer L., Malthus T.J.** Application of Landsat-7 satellite data and a DEM for the quantification of thermokarst-affected terrain types in the periglacial Lena-Anabar coastal lowland // Polar Res., 2006, vol. 25, p. 51–67.
- Grosse G., Robinson J., Bryant R. et al.** Distribution of late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of the Yedoma Suite in east and central Siberia, Russia. Reston, Virginia, USA, 2013. U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 2013-1078, 37 p.
- Günther F., Overduin P., Sandakov A. et al.** Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosciences, 2013, vol. 10, p. 4297–4318.
- Morgenstern A., Grosse G., Günther F. et al.** Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta // The Cryosphere, 2011, vol. 5, No. 4, p. 849–867.
- Morgenstern A., Ulrich M., Günther F. et al.** Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study // Geomorphology, 2013, vol. 201, p. 363–379.
- Romanovsky V.E., Kholodov A.L., Marchenko S.S. et al.** Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 2010, vol. 21, p. 136–155.
- Schirrmeyer L., Kunitzky V., Grosse G. et al.** Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands – A review // Quatern. Intern., 2010, vol. 241, p. 3–25.
- Schirrmeyer L., Siegert K., Kunitzky V. et al.** Late Quaternary ice-rich permafrost sequences as a paleoenvironmental archive for the Laptev Sea Region in Northern Siberia // Intern. J. Earth Sci., 2002, vol. 91, No. 1, p. 154–167.
- Strauss J., Schirrmeyer L., Grosse G. et al.** The deep permafrost carbon pool of the Yedoma region in Siberia and Alaska // Geophys. Res. Lett., 2013, vol. 40, p. 6165–6170.
- Tucker C.J., Grant D.M., Dykstra J.D.** NASA's global orthorectified Landsat data set // Photogramm. Eng. Remote Sens., 2004, vol. 70, p. 313–322.
- Veremeeva A., Gubin S.** Modern tundra landscapes of the Kolyma Lowland and their evolution in the Holocene // Permafrost and Periglacial Processes, 2009, vol. 20, No. 4, p. 399–406.

Поступила в редакцию
23 декабря 2014 г.