
**МЕТОДИКА НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 551.4:528.067.4 (470.332+476.5)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ГЛЯЦИОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ В КРАЕВОЙ ЗОНЕ
ЮГО-ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА ПОСЛЕДНЕГО СКАНДИНАВСКОГО
ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА**© 2020 г. Н. В. Карпухина^{1,*}, О. С. Сизов^{2,3}¹ *Институт географии РАН, Москва, Россия*² *Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия*³ *РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия**E-mail: natalia_karpukhina@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2019 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 17.12.2019 г.

Гляциоморфологическое картографирование является одним из основных методов изучения структуры и динамики бывших ледниковых покровов. В связи с активным использованием данных дистанционного зондирования Земли для картографирования рельефа в последние десятилетия наблюдается активное развитие данной отрасли. Стали появляться открытые базы данных форм ледникового и водно-ледникового рельефа, что создает предпосылки для лучшего понимания процессов ледникового морфогенеза и построения детальных палеогляциологических реконструкций. В России такие базы данных пока не получили развития, поскольку практически отсутствуют работы по детальному сплошному гляциоморфологическому картографированию. В ходе исследования на примере ключевого участка, расположенного в краевой зоне юго-восточного сектора последнего Скандинавского ледникового покрова, осуществлена разработка методических приемов для проведения детального гляциоморфологического картографирования. Анализ доступных (SRTM, AW3D30, WorldDEM) цифровых моделей рельефа (ЦМР) показал, что наилучшим образом для визуального анализа рельефа подходит ЦМР WorldDEM (разрешение 12 м), а для расчета морфометрических показателей – AW3D30 (разрешение 30 м). Установлено, что в пределах залесенных территорий доступные цифровые модели рельефа пригодны исключительно для среднемасштабной съемки, в то время как на свободных от леса поверхностях имеются перспективы для составления крупномасштабных карт. По итогам работ выявлены и описаны устойчивые дешифровочные признаки ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа, на основе которых составлена гляциоморфологическая карта района исследования. Установлено, что изометричные положительные формы рельефа на залесенных территориях идентифицировать визуально практически невозможно, зато изометричные отрицательные формы выражены хорошо на любых поверхностях. Линейно-вытянутые формы выделяются более уверенно по сравнению с изометричными вне зависимости от степени залесенности. Результаты гляциоморфологического картографирования ключевого участка будут положены в основу базы пространственных данных, которую планируется расширить на весь российский сектор краевой зоны Скандинавского ледникового покрова поздневалдайского (осташковского) оледенения.

Ключевые слова: гляциоморфологическое картографирование, Скандинавский ледниковый покров, поздний валдай, данные ДЗЗ, цифровые модели рельефа (ЦМР)

DOI: 10.31857/S0435428120020054

ВВЕДЕНИЕ

Гляциоморфологическое картографирование как подтип геоморфологического картографирования дает информацию о пространственном положении форм и комплексов ледникового и водно-ледникового рельефа, тем самым являясь ключевым методом для реконструкции структуры и динамики бывших ледниковых покровов. До 80-х годов XX века составление гляциоморфологических карт осуществлялось на основе аэрофотоснимков, материалов полевых исследований и разномасштабных топографических карт [1–5 и др.], что представляло собой трудоемкую задачу и не позволяло рассматривать большие по площади территории. Появление космических снимков, а затем и цифровых моделей рельефа способствовало ускорению процесса картографирования, повышению его точности и степени охвата исследуемой территории. О положительных сторонах использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) неоднократно говорилось в работах исследователей [6, 7 и др.].

Все это обусловило всплеск в развитии гляциоморфологического картографирования в Скандинавии [8 и др.], на Британских островах [9, 10 и др.], в Северной [11, 12] и Южной Америке [13 и др.]. Прирост информации, особенно за последние 15 лет, дал толчок к появлению баз пространственных данных, содержащих результаты дешифрирования данных ДЗЗ [14–16]. Хорошая визуализация материала и открытость баз данных создают предпосылки для лучшего понимания процессов ледникового морфолитогенеза, построения детальных палеогляциологических реконструкций, а также возможность их обновления и пополнения новыми формами ледникового рельефа. В России такие базы пока не получили развития, что связано с отсутствием работ по детальному гляциоморфологическому картографированию.

В мелком масштабе для территории всей страны ледниковые формы представлены в виде отдельного тематического слоя карты четвертичных образований м-ба 1:2500000 [17], основанного на материалах государственных геологических карт м-ба 1:1000000 с частичными дополнениями [18]. Результаты среднемасштабного гляциоморфологического картографирования на отдельные районы Восточно-Европейской равнины, п-овов Ямал, Таймыр и Камчатка представлены в работах отечественных и зарубежных исследователей [19–25]. Ввиду того, что полученные результаты использовались для реконструкции бывших ледников, основное внимание в работах было обращено на картографирование краевых образований, необходимых для восстановления границ основных этапов развития оледенений, и линейно-вытянутых форм — друмлинов, флютингов, гигантских ледниковых линейно-вытянутых гряд, позволяющих судить о направлении движения гляциоструктурных единиц (лопастей, языков и микроязыков). Работы по крупномасштабному гляциоморфологическому картографированию с привлечением лидаров или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) практически отсутствуют, что определяется высокой стоимостью работ по лидарной съемке и трудоемкостью проведения съемки с БПЛА.

Результаты сплошного детального картографирования в краевой зоне поздневалдайского (осташковского) оледенения дадут новую информацию, касающуюся структуры и динамики последнего ледникового покрова, что актуально в свете продолжающейся дискуссии относительно границы максимального продвижения льдов в позднем валдае.

Цель работы — осуществить детальное картографирование форм ледникового рельефа на Восточно-Европейской равнине в пределах ключевого участка, приуроченного к краевой зоне юго-восточного сектора поздневалдайского (осташковского) оледенения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КЛЮЧЕВОГО УЧАСТКА

В целом краевую зону последнего оледенения можно сопоставить с положением главного водораздела Восточно-Европейской равнины (рис. 1). Данная территория

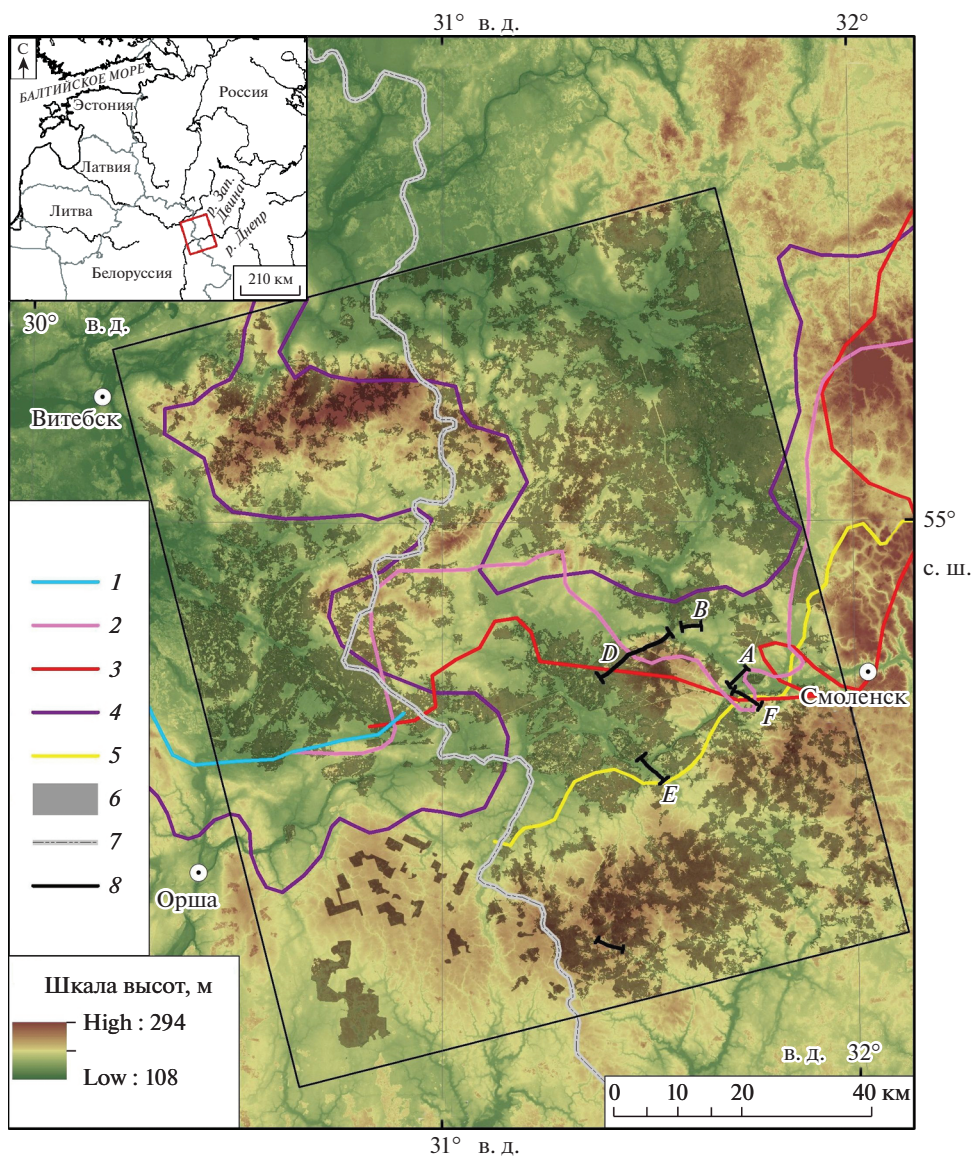


Рис. 1. Географическое положение района исследования.

Граница максимального распространения поздневалдайского (осташковского) оледенения по: 1 – [49], 2 – [26], 3 – [50], 4 – [20], 5 – [18]; 6 – леса; 7 – государственная граница; 8 – линии профилей.

характеризуется разнообразием форм рельефа, но процесс их идентификации осложнен наличием обширных лесных массивов. Высота деревьев составляет около 20–30 м, а лесные массивы характеризуются высокой степенью сомкнутости, искажая поле высот и скрывая под своим пологом большинство мезоформ рельефа. Открытых участков в краевой зоне поздневалдайского (осташковского) оледенения немного. Как правило, они приурочены к староосвоенным регионам. Рассматриваемый ключевой уча-

сток расположен в пределах Смоленской области РФ и Витебской области Республики Беларусь. Лесная растительность занимает не более 40% территории участка (рис. 1), что благоприятствует процессу дешифрирования. В составе лесов преобладают мелколиственные породы с примесью ели и сосны, местами отмечаются сосновые леса.

Общая площадь участка 11631 км². Абсолютные отметки изменяются от 130 до 300 м. Наибольшие высоты приурочены к возвышенностям: Витебской и Смоленско-Московской. Наименьшие к низменностям: Лучесинской и Касплянской (рис. 1). На севере и в центре участка развит холмисто-грядовый рельеф краевых образований, чередующийся с плоскими и полого-волнистыми поверхностями ледниковой и водно-ледниковой аккумуляции; рельеф слабо переработан эрозионными и склоновыми процессами, немало озер. Южная часть представляет собой расчлененную моренную равнину и холмисто-грядовый рельеф краевых образований, осложняющих Смоленско-Московскую возвышенность.

Рельеф ключевого участка преобразован ледниковыми покровами поздневалдайского и позднемосковского возраста. Согласно имеющимся палеогляциологическим моделям, формирование рельефа северной и центральной частей участка связано с деятельностью Лучесинского языка, относящегося к Псковско-Великоречской лопасти, Чудского потока поздневалдайского (осташковского) оледенения и Двинско-Касплянского языка, Ловатской лопасти, Ладожского потока [26]. Образование южного фрагмента территории сопоставляется с деятельностью московского ледникового покрова [27, 28 и др.]. Современные знания о геолого-геоморфологическом строении обоих участков опираются на результаты исследований, прежде всего геологов-съемщиков 50–80-х годов XX века [29 и др.], а также исследователей, занимавшихся вопросом развития оледенений в пределах Восточно-Европейской равнины [5, 20, 30–32].

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Методика анализа, выявления и картографирования рельефа в районах покровных оледенений, как правило, опирается на визуальный анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР)¹, дополняемый анализом космических снимков и частичной автоматизацией обработки результатов дешифрирования.

Из всех доступных на сегодняшний день ЦМР использовались следующие модели: SRTM30 [33], AW3D30 [34], WorldDEM [35]. В качестве основного источника мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выбраны снимки со спутников Sentinel-2 [36], которые среди открытых данных ДЗЗ являются наиболее предпочтительными для картографирования рельефа в среднем масштабе, особенно в силу наличия каналов в среднем ИК-диапазоне, превосходящих по разрешению и ширине полосы захвата возможности сенсора OLI спутника Landsat-8.

В качестве источника геологической информации использовались государственные карты м-ба 1:1000000 и 1:200000 в растровом виде, доступные через информационные ресурсы ВСЕГЕИ [37]. Кроме того, были задействованы фондовые и опубликованные материалы, а также результаты собственных полевых исследований 2016–2019 гг.

Основная часть работ по гляциоморфологическому картографированию проводилась в среде программы ArcGIS Desktop 10.3.1.

АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

Визуальный анализ перечисленных ЦМР (SRTM 30, AW3D30, WorldDEM) показал, что в условиях повышенной залесенности территории наилучшие результаты дает ис-

¹ В статье под термином цифровая модель рельефа (ЦМР) понимается цифровая модель местности, содержащая информацию о ее рельефе [51].

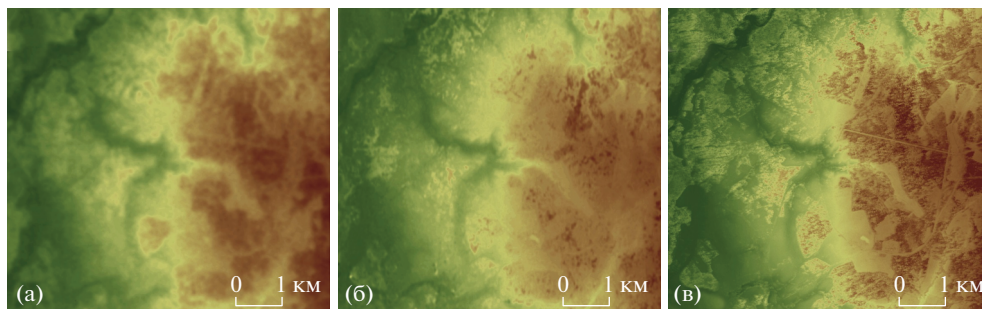


Рис. 2. Фрагменты ЦМР: (а) – SRTM, разрешение 30 м, (б) – AW3D30, разрешение 30 м, (в) – WorldDEM, разрешение 12 м.

пользование WorldDEM, имеющей разрешение выше, чем на других моделях (рис. 2, в). В отличие от SRTM30 и AW3D30, на WorldDEM лесные массивы выражены лучше, что дает возможность учитывать распространение леса при визуальном дешифрировании. Кроме того, на WorldDEM четче выражены контуры форм мезорельефа. Однако тайлы данной ЦМР, имеющиеся в нашем распоряжении, не полностью покрывают территорию ключевого участка, поэтому на остальной территории для визуального анализа применялась ЦМР AW3D30. AW3D30 обладает более качественным первоначальным разрешением исходных данных, нежели SRTM 30, что делает ее актуальнее, детальнее и точнее (рис. 2 а, б).

Для проверки достоверности и точности ЦМР SRTM30, AW3D30 и WorldDEM использовались данные геодезических измерений, выполненные по линиям трех профилей на безлесных участках – А, F, Е (рис. 1). Измерения выполнялись в 2017 г. GPS-приемником Leica 1200 в режиме кинематики с постобработкой и уравниванием по данным базовой станции. Для сравнения использовались исходные ЦМР без дополнительной обработки, чтобы не нарушить структуру и границы ячеек регулярной сетки цифровой модели. Проверка точности пространственной привязки по хорошо выделяющимся антропогенным и водным объектам показала, что улучшение привязки не требуется, погрешность определения координат не превышает заявленных разработчиками показателей.

В ходе расчетов на первом этапе устранялось систематическое расхождение абсолютной высоты эллипсоида ЦМР над эллипсоидом системы координат геодезических измерений путем вычитания целочисленного значения разницы усредненных высот пикетов с высотой, соответствующей ячейке регулярной сетки ЦМР. Минимальная разница абсолютной высоты была выявлена для AW3D30 (0.3 м), максимальная – для WorldDEM (20.3 м).

На втором этапе для сравнения строились графики усредненной высоты пикетов и откорректированных высот, соответствующих ячейкам регулярной сетки каждой ЦМР. По откорректированным высотам ЦМР проводился расчет среднего, максимального и минимального расхождения, а также среднеквадратического отклонения от базовых геодезических измерений. Полученные графики показаны на рис. 3, результаты расчетов в обобщенном виде представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что среднее расхождение высот не превышает 0.3 м, графики высот по ЦМР достоверно отражают относительные морфологические черты форм рельефа. По величине максимальных и минимальных расхождений, а также по стандартному отклонению наилучшими показателями характеризуется AW3D30. Для SRTM30 характерно избыточное сглаживание, которое нивелирует

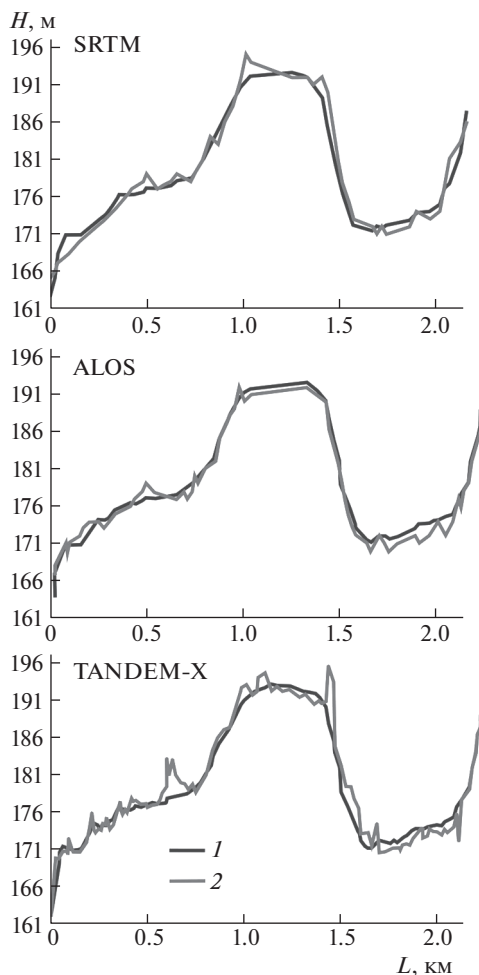


Рис. 3. Сопоставление высот по линии профиля А (см. рис. 1), полученных на основе геодезической съемки (1) и по данным различных ЦМР (2).

локальные перепады высот, на WorldDEM проявляется значительное количество шумов, определяемых меньшим размером ячеек регулярной сети (10×12 м) и высокой точностью данных (десятичные значения). Для SRTM30 характерно небольшое смещение пространственной привязки, что вызывает погрешность определения высот на границе залесенных и незалесенных участков (было выявлено для профиля “Е”) и рост среднеквадратической ошибки. На отдельные неточности (локальные “выбросы” на графиках) для всех ЦМР влияет неоднородность (шероховатость) подстилающей поверхности, наличие контрастных антропогенных объектов и ошибки интерполяции исходных измерений (невозможность достоверной дискретизации). В целом все исходные ЦМР отличаются высоким качеством и по величине вертикальной точности не превышают значений, определенных в ходе многочисленных независимых исследований. Наилучшими показателями характеризуется AW3D30, что обусловлено спе-

Таблица 1. Результаты сопоставления ЦМР и данных прямых геодезических наблюдений

Показатель	ЦМР	Название профиля (см. рис. 1)			Среднее арифметическое по ключевому участку
		А	Е	Ф	
Среднее расхождение	SRTM	0.4	0.4	−0.3	0.2
	AW3D30	0.1	0.4	0.4	0.3
	WorldDEM	−0.3	0.1	−0.3	−0.2
Максимальное	SRTM	2.2	6.8	2.9	4.0
	AW3D30	4.9	3.3	2.7	3.6
	WorldDEM	1.1	4.8	5.0	3.6
Минимальное	SRTM	−1.7	−3.3	−4.9	−3.3
	AW3D30	−2.3	−2.0	−3.0	−2.4
	WorldDEM	−8.0	−1.8	−7.4	−5.7
Стандартное отклонение	SRTM	0.9	2.6	1.5	1.7
	AW3D30	1.2	1.0	1.1	1.1
	WorldDEM	0.9	1.2	1.6	1.2
Абсолютная поправка	SRTM	0	1	−3	−0.7
	AW3D30	1	2	−2	0.3
	WorldDEM	21	22	18	20.3

цифкой обработки и более высокой детальностью исходных данных для создания модели. Однако данные выводы справедливы только для безлесных участков.

Для выявления ошибок, которые вносит лесной покров в отображение форм рельефа, по ЦМР WorldDEM были построены три пары профилей различной длины через отдельные формы рельефа. Парные профили проводились в непосредственной близости друг от друга (не более 50 м), при этом один из профилей пары проходил по просеке ЛЭП, а второй – по лесопокрытой территории.

Сравнение полученных графиков высот (рис. 4) показывает, что, с одной стороны, лесная растительность вносит существенные искажения вертикального масштаба в отображение ледниковых форм рельефа, особенно с небольшой амплитудой высот (пары профилей по линиям С, D). С другой стороны, на всех примерах разреженный и неоднородный растительный покров не может скрыть существующие относительные перепады высот. Исключение составляют небольшие по размерам формы рельефа, высота которых не превышает величины естественной вариации высоты доминирующих лесных пород.

Таким образом, растительность не препятствует визуальному геоморфологическому анализу и выявлению средних и крупных форм рельефа (с линейными размерами более 10 ячеек регулярной сети ЦМР или 300 м) с учетом возникающих искажений. Однако построению морфометрических карт залесенных территорий требуется дополнительная фильтрация ЦМР в части удаления растительного покрова.

ДЕШИФРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ ФОРМ ЛЕДНИКОВОГО И ВОДНО-ЛЕДНИКОВОГО РЕЛЬЕФА

Основная задача данной работы – идентифицировать формы рельефа, опираясь на ЦМР и космические снимки, а затем, по возможности, провести верификацию путем сопоставления результата с фактическим материалом. Дешифровочные признаки форм ледникового и водно-ледникового рельефа описывались в работах многочис-

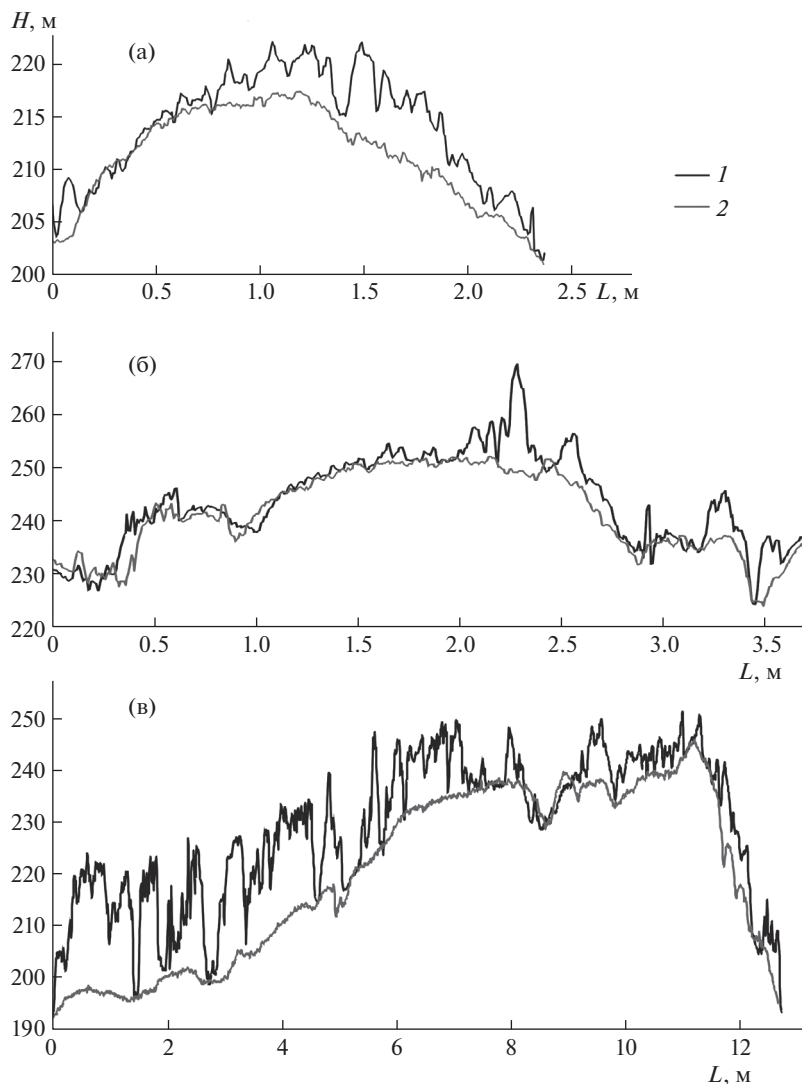


Рис. 4. Искажения высот на залесенных территориях, зафиксированные по линиям профилей В – (а), С – (б) и D – (в) (см. рис. 1) по ЦМР AW3D30.

Профиль: 1 – через залесенную поверхность, 2 – по просеке в лесу.

ленных авторов [9, 19, 38, 39 и др.]. Основными признаками являются плановая конфигурация форм рельефа, их морфологические и морфометрические характеристики, положение в ландшафте, а также фитоиндикационные особенности, отражающие внутреннее строение форм рельефа и различия в степени увлажнения их поверхностей.

В ходе дешифрирования авторами статьи была адаптирована методика идентификации форм ледникового и водно-ледникового рельефа, обнаруженных в пределах ключевых участков. Ниже описаны основные критерии выделения форм рельефа.

– Краевые ледниковые образования (ice-marginal moraines) – это совокупность форм рельефа и отложений, возникающих в краевой зоне ледника в определенный

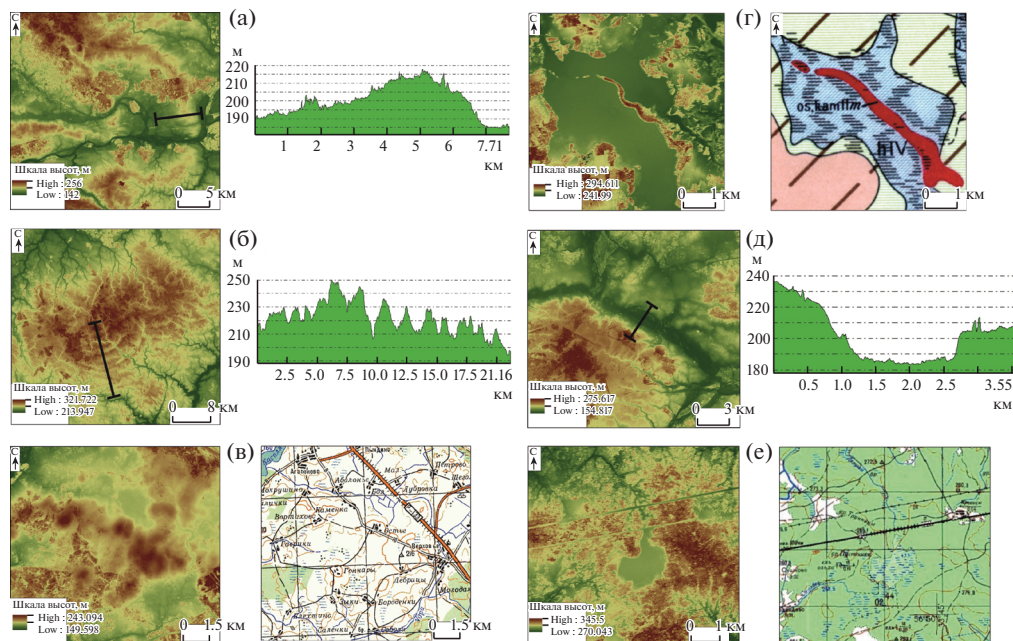


Рис. 5. Диагностические признаки форм ледникового и водно-ледникового рельефа.

(а) — конечно-моренные гряды и профиль через одну из них; (б) — серия близко расположенных конечно-моренных гряд; (в) — камы на ЦМР и топографической карте м-ба 1:100000; (г) — озовая гряда на ЦМР и карте четвертичных отложений м-ба 1:200000; (д) — ложбина стока талых ледниковых вод и поперечный профиль через нее; (е) — заболоченное гляциокарстовое понижение.

момент его развития, т.е. при определенном положении его края в пространстве [40–42]. Краевые образования в плане характеризуются дугообразным строением, высотой до 30 м, шириной 1–3 км, состоящие из одной или серии гряд (рис. 5 а, б), ориентированы перпендикулярно к бывшим линиям тока ледника, посредством угловых массивов образуют выдержанные дуги. Склоны гряд краевых образований, как правило, асимметричны [43–46]. Формы, маркирующие край ледника, могут быть связаны с деятельностью: активного — конечные (рис. 5, а) и боковые морены (end or terminal, lateral moraines), пассивного и мертвого льда — рецессионные морены (recessional moraines); озы и камы² (eskers and kames). Нередко краевые образования представлены в виде небольших гряд или холмов, слабовыраженных в рельефе, что может быть обусловлено различными причинами: небольшим количеством материала, находившегося у фронта ледника; неравномерным перераспределением материала при таянии блоков мертвого льда в толще отложений; активным размывом краевой зоны талыми ледниковыми водами во время дегляциации.

— Камы (kames) — холмы изометричной формы, расположены беспорядочно, часто в виде групп, приурочены к областям развития озов и холмисто-западинного рельефа

² Нередко исследователи разделяют озы и камы на маргинальные и радиальные [2]. Маргинальные озы и камы закладываются в субпараллельных краю открытых трещинах между активным и пассивным и мертвым льдом, либо за счет наличия флювиодельта у края ледника (озы при слиянии флювиодельта) [41, 46–48]. Радиальные озы и камы формировались перпендикулярно направлению бывшего движения ледника [47]. В данной работе камы и озы, входящие в состав краевых образований, обозначались отдельными значками.

абляционной морены [47 и др.], относительная их высота не превышает 15 м. В пределах незалесенных территорий камы выражены довольно ярко, что позволяет их диагностировать с помощью ЦМР (рис. 5, в). На залесенных участках выявить камовые холмы на основе данных ДЗЗ крайне сложно. Информация о местоположении камов в пределах залесенных территорий была заимствована из фондовых и собственных полевых материалов.

— Ложбины стока талых ледниковых вод (meltwater channel) — линейно-вытянутые, преимущественно спрямленные отрицательные формы рельефа, зачастую имеют ложбинообразный поперечный профиль (рис. 5, е). Часто простираются вдоль дистального склона краевых образований, являясь одним из признаков положения фронта бывшего ледника [42, 44]. Нередко такие ложбины освоены современной речной сетью, но морфология таких долин говорит о том, что сила потока современных рек и характер их воздействия не способны выработать такие эрозионные формы. Бывшие ложбины стока талых ледниковых вод нередко заболочены, либо заняты темнохвойными лесами, которые хорошо выделяются в среднем ИК-диапазоне.

— Гляциокарстовые понижения — мелкие западины (kettles, kettleholes), как правило, имеют изометричную форму, заняты небольшим бессточным или слабопроточным озером, либо болотом, приурочены к областям развития мелкохолмисто-западинного рельефа абляционной морены, камово-озового ландшафта и зандровым равнинам [46]. В отличие от ранее описанных форм рельефа такие понижения выражены лучше на покрытых лесом территориях, где представляют собой плоские, зачастую заболоченные, однородные по высоте поверхности (рис. 5, е).

— Лимногляциальные равнины (limnoglacial plain) формировались на месте развития обширных приледниковых озер (proglacial lakes), тяготеют к осевым частям низменностей, сложены песками, алевритами и глинами. На космических снимках пространственное положение обширных лесных массивов, представленных, главным образом, хвойными породами, соответствует участкам лимно-гляциальных равнин.

Результаты дешифрирования хорошо коррелируют с материалами собственных полевых исследований и геологической съемки в данном районе. Однако из-за того, что леса в пределах района исследования сохранились фрагментарно, положение лимно-гляциальных равнин уточнялось на основе фактического материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛЯЦИОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

В процессе дешифрирования на ключевом участке удалось выделить ряд аккумулятивных форм ледникового и водно-ледникового рельефа (рис. 6, табл. 2). Экзарационных форм обнаружено не было, что обусловлено положением ключевого участка в зоне аккумуляции последнего ледникового покрова (по А.А. Асееву [45]). Для более полного суждения о характере распространения озов и камов, которые сложно идентифицировать при наличии сомкнутого лесного покрова, на карты были добавлены ранее известные формы рельефа, описанные в геологических отчетах и прочих источниках фактических данных.

Краевые образования, представленные в основном конечно-моренными грядами, выражены лучше остальных форм рельефа, а среди линейно-вытянутых форм являются наиболее распространенными (табл. 2). Наилучшей сохранностью обладают гряды, расположенные в западной части ключевого участка. Вероятно, слабая выраженность и фрагментарность гряд восточной части участка связаны с последующим их размытием, на что указывает наличие крупных ложбин стока и современных речных долин (рис. 6).

Стоит отметить, что наиболее крупной является серия гряд, формирующих Витебскую возвышенность. Согласно палеогляциологическим представлениям [20, 26], образование этих гряд происходило в максимум развития поздневалдайского оледене-

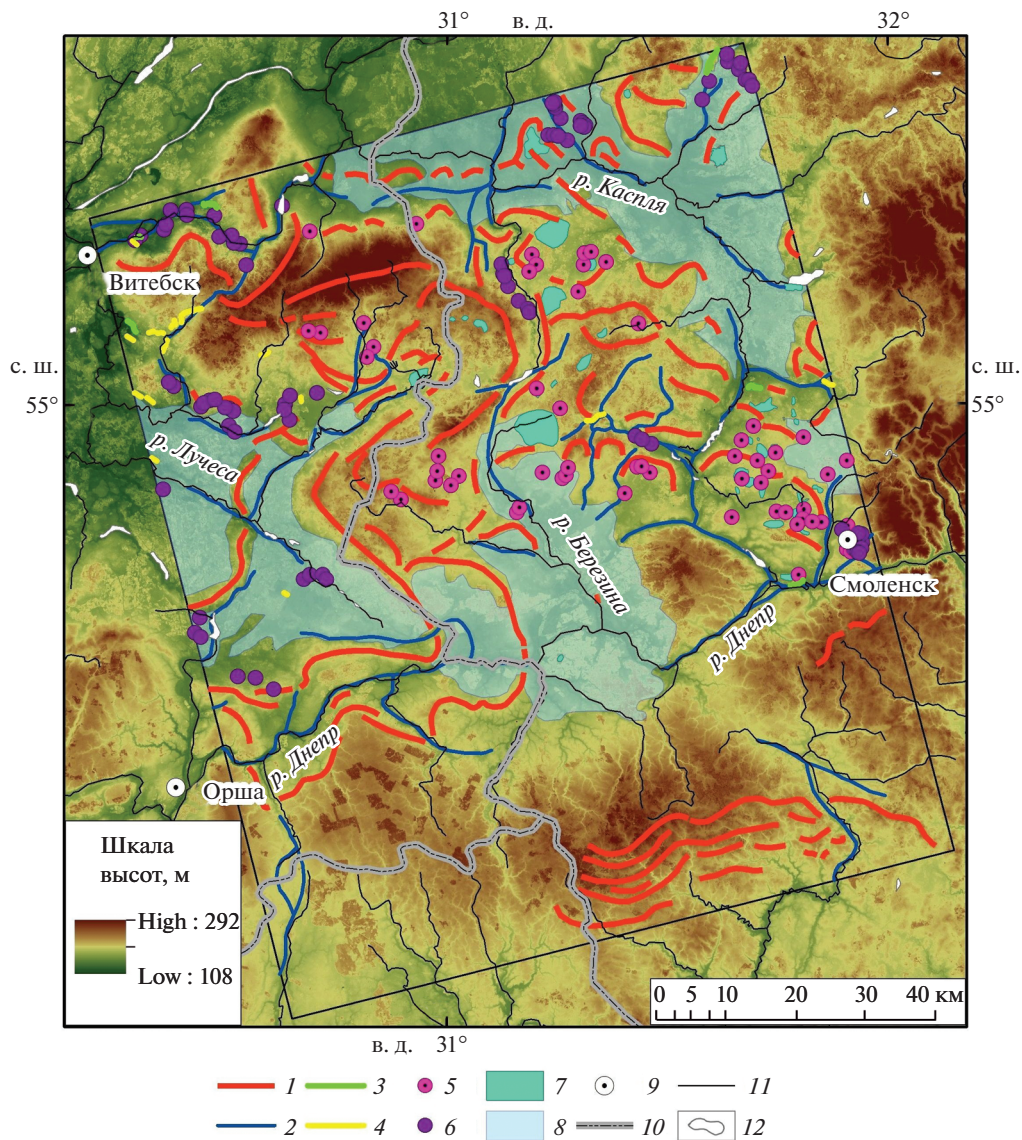


Рис. 6. Гляциоморфологическая карта на ключевой участок.

1 – краевые образования; 2 – ложбины стока талых ледниковых вод; озы: 3 – выделенные по ДЗЗ, 4 – по фондовым и полевым материалам; камы: 5 – выделенные по ДЗЗ, 6 – по фондовым материалам; 7 – гляциокарстовые понижения; 8 – лимно-гляциальные равнины (области развития бывших приледниковых озер); 9 – населенные пункты; 10 – государственная граница; 11 – гидросети; 12 – озера.

ния и на начальных этапах деградации ледника. В южной части Смоленского участка выделяется серия близкорасположенных конечно-моренных гряд, образующих Смоленско-Московскую возвышенность, формирование которой связывают с московским ледниковым покровом [20, 27, 28]. Ввиду отсутствия обоснованных результатов датирования краевых образований, оценка их возраста представляет собой отдельную научную задачу.

Таблица 2. Формы ледникового и водно-ледникового рельефа в пределах ключевого участка

Формы рельефа	Количественные показатели по ключевому участку
Краевые образования (кол-во линий/длина, км)	125/1023
Озы (кол-во линий/длина, км)	23/35.77
по данным ДЗЗ	7/15.95
по фондовым и полевым материалам	16/19.82
Камы (кол-во точек)	143
по данным ДЗЗ	60
по фондовым и полевым материалам	83
Гляциокарстовые понижения (кол-во полигонов/площадь, км ²)	39/111.54
Ложбины стока талых ледниковых вод (кол-во линий/длина, км)	52/794.12
Области, занятые лимно-гляциальными равнинами (кол-во полигонов/площадь, км ²)	4/2924

В отличие от краевых образований, озовые гряды дешифрировать довольно сложно. В пределах района исследования удалось обнаружить всего 7 гряд (табл. 2). Хорошая видимость обнаруженных озовых гряд обусловлена их значительными размерами и слабой залесенностью территории. В целом были зафиксированы 23 озовых гряды.

В отношении камов можно отметить, что на залесенных территориях их поиск невозможен (табл. 1, рис. 4). Камовых холмов удалось идентифицировать довольно много на свободных от леса поверхностях (табл. 2, рис. 6). Часть из них нашла подтверждение в процессе верификации, остальные нуждаются в проверке.

К озово-камовым ландшафтам тяготеют гляциокарстовые депрессии, формирование которых связано с процессами длительного таяния глыб мертвого льда (табл. 2). Стоит отметить, что большая часть камов, озов и гляциокарстовых западин приурочена к области развития Двинско-Касплянского языка (севернее р. Днепр). Вероятно, это указывает на наличие блоков неподвижного мертвого льда, длительно таявших здесь.

Среди отрицательных форм рельефа выделяются ложбины стока талых ледниковых вод, чей морфологический облик позволяет их достоверно идентифицировать. На рис. 6 изображены наиболее крупные ложбины стока. В пределах ключевого участка выделяются территории, где ложбины стока либо окаймляют краевые образования, либо представляют собой продолжение края ледника. Помимо маргинальных, широко распространены и радиальные ложбины, секущие краевые образования. Данная особенность визуально читается и на гляциоморфологической карте (рис. 6).

Участки лимно-гляциальных равнин соответствуют пониженным участкам района исследования (в районе рр. Каспля, Лучеса, Березина и Днепра) и, как правило, разделены комплексами краевых образований.

В ходе детального картографирования авторами создана гляциоморфологическая карта на участок краевой зоны в пределах российско-белорусского пограничья. Полученные результаты картографирования, по сравнению с работами предшественников, позволили создать основу для будущей базы данных гляциоморфологических объектов в краевой зоне последнего оледенения, а также уточнить понимание структуры и динамики поздневалдайского (осташковского) оледенения в пределах ключевого участка. Плановый рисунок краевых образований позволяет реконструировать гляциодинамическую структуру последнего ледника, которая существенно отличается от ранее созданной Н.С. Чеботаревой и М.А. Фаустовой [26], но сходна с результатами, полученными В. Калмом [20].

ВЫВОДЫ

1. ЦМР WorldDEM, обладающую наиболее высоким пространственным разрешением, предпочтительнее использовать для визуального анализа рельефа. Для выполнения морфометрических исследований в пределах безлесных участков наилучшими показателями характеризуется ЦМР AW3D30. Роль растительности — значительная. Поле высот, как правило, искажается не менее чем на 15 м.

2. Анализируемые ЦМР в пределах залесенных территорий подходят исключительно для среднемасштабного картографирования, но на свободных от леса поверхностях сохраняются перспективны для крупномасштабных работ. Минимальная высота форм рельефа, которые удалось идентифицировать в пределах района исследования, — 10 м.

3. Линейно-вытянутые формы рельефа (конечно-моренные образования, озы, ложбины стока) легче идентифицировать, чем изометричные. Поиск отрицательных линейно-вытянутых форм упрощается за счет спектральных различий на космических снимках. Выраженность конечно-моренных образований значительно выше, нежели озов. Озовые гряды выделяются исключительно на незалесенных поверхностях.

4. Изометричные положительные формы рельефа (камы, моренные холмы) в пределах залесенных территорий идентифицировать визуально практически невозможно. Изометричные отрицательные формы рельефа (гляциокарстовые понижения) как на залесенных, так и незалесенных территориях выражены хорошо за счет резкой смены растительного покрова и наличия следов заболачивания.

5. Результаты гляциоморфологического картографирования будут положены в основу базы данных, которую планируется расширить на весь российский сектор краевой зоны Скандинавского ледникового покрова поздневалдайского (осташковского) оледенения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Полевые исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ № 17-17-01289 (Смоленский район, Смоленской области) и РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-01033 (остальная часть территории). Работы по картографированию осуществлялись в рамках темы госзадания № 0148-2019-0005. Авторы выражают отдельную благодарность С.С. Бричевой и В.М. Матасову за предоставленные материалы геодезической съемки, а также двум рецензентам за ценные замечания. Особое внимание в статье было уделено анализу ЦМР. Данные WorldDEM (TanDEM-X) были любезно предоставлены Немецким аэрокосмическим агентством (DLR) в рамках заявки: DEM_GEOL1527.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hollingworth S.* Glaciation of western Edenside and adjoining areas and the drumlins of the Edenside and Solway Basin // *Quarterly Journal of the Geological Society of London.* 1931. Vol. 87. P. 281–359.
2. Методическое руководство по изучению и геологической съемке четвертичных отложений. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 486 с.
3. *Чеботарёва Н.С., Недошивина М.А., Столярова Т.И.* Московско-валдайские (микулинские) межледниковые отложения в бассейне Верхней Волги и их значение для палеогеографии // *Бюл. комис. по изуч. четвертич. периода.* 1961. № 26. С. 35–49.
4. *Prest V., Grant D., and Rampton V.* Glacial map of Canada. Geological Survey of Canada. 1968. Map 1253A.
5. *Фаустова М.А.* Рельеф и отложения Ловатской лопасти последнего ледникового покрова. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИГРАН, 1972. 208 с.
6. *Punkari M.* Glacial geomorphology and dynamics in the eastern parts of the Baltic Shield interpreted using Landsat imagery // *Photogrammetric Journal Finland.* 1982. Vol. 9. P. 77–93.

7. Clark C. Reconstructing the evolutionary dynamics of former ice sheets using multitemporal evidence, remote sensing and GIS // *Quaternary Science Reviews*. 1997. Vol. 16. P. 1067–1092.
8. Kleman J., Hättestrand C., Borgström I., and Stroeven A. Fennoscandian palaeoglaciology reconstructed using a glacial geological inversion model // *Journal of Glaciology*. 1997. Vol. 43. P. 283–299.
9. Clark C., Evans D., Khatwa A., Bradwell T., Jordan C., Marsh S., Mitchell W., and Bateman M. Map and GIS database of glacial landforms and features related to the last British ice sheet // *Boreas*. 2004. Vol. 33. P. 359–375.
<https://doi.org/10.1080/03009480410001983>
10. Evans D., Clark C., and Mitchell W. The last British Ice Sheet: A review of the evidence utilised in the compilation of the Glacial Map of Britain // *Earth-Science Reviews*. 2005. Vol. 70(3). P. 253–312.
11. Sharpe J., Sharpe D., and Harris J. A flow line map of glaciated Canada based on remote sensing data // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2010. Vol. 47. P. 89–101.
12. Atkinson N., Utting D., and Pawley S. Landform signature of the Laurentide and Cordilleran ice sheets across Alberta during the last glaciation // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2014. Vol. 51(12). P. 1067–1083.
13. Glasser N., Jansson K., Harrison S., and Kleman J. The glacial geology and Pleistocene history of South America between 38,8S and 56,8S // *Quaternary Sci. Rev.* 2008. Vol. 27. P. 365–390.
14. The BRITICE Glacial Mapping Project: version two release, 2017: <https://shefuni.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=fd78b03a74bb477c906c5d4e0ba9abaf>
15. Glacial Landforms of Alberta, Canada: <https://ags-aer.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1&layers=dde978e052d440cd9ab406b1e0398377>
16. Norris S.L., Margold M., and Froese D.G. Glacial landforms of northwest Saskatchewan // *Journal of Maps*. 2017. Vol. 13. No. 2. P. 600–607.
<https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1342212>
17. Карта четвертичных образований масштаба 1:2500000 территории Российской Федерации. Пояснительная записка. 2010. 220 с.
18. Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., and Chuyko M. Glaciomorphological Map of the Russian Federation // *Quaternary Int.* 2015. Vol. 420. P. 4–14.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024>
19. Hättestrand C. and Clark C. The glacial geomorphology of Kola Peninsula and adjacent areas in Murmansk Region, Russia // *Journal of Maps*. 2006. Vol. 2006. P. 30–42.
20. Kalm V. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea // *Quaternary Sci. Rev.* 2012. Vol. 44. P. 51–59.
21. Fredin O., Rubensdotter L., Welden A., Larsen E., and Lysa A. Distribution of ice marginal moraines in NW Russian // *Journal of Maps*. 2012. Vol. 8:3. P. 236–241.
<https://doi.org/10.1080/17445647.2012.708536>
22. Карпухина Н.В. Особенности деградации ошашковского ледникового покрова в пределах Чудско-Псковской низменности // *Геоморфология*. 2013. № 4. С. 38–47.
23. Судакова Н.Г., Карпунин С.С., Алтынов А.Е. Палеогеографические реконструкции ледниковых морфолитоструктур Подмосквья с использованием космической информации // *Бюл. комис. по изуч. четвертич. периода*. М.: ГЕОС, 2015. № 74. С. 76–89.
24. Сизов О.С. Дискуссионные вопросы актуализации методики среднемасштабного геоморфологического картографирования (на примере п-ова Ямал) // *Проблемы региональной экологии*. 2018. № 5. С. 172–179.
25. Barr I. and Clark D. Distribution and pattern of moraines in Far NE Russia reveal former glacial extent // *Journal of Maps*. 2009. Vol. 5. P. 186–193.
26. Структура и динамика последнего ледникового покрова Европы. М.: Наука, 1977. 144 с.
27. Московский ледниковый покров Восточной Европы. М.: Наука, 1982. 239 с.
28. Velichko A., Faustova M., Pisareva V., Gribchenko Yu., Sudakova N., and Lavrentiev N. Glaciations of the East European Plain: distribution and chronology // *Quaternary Glaciations: a Closer Look (Developments in Quaternary Science)*. 2011. Vol. 15. P. 337–359.
29. Бреслав С.Л. Четвертичная система // *Геология СССР*. т. IV. М.: Недра, 1971. С. 489–636.
30. Фаустова М.А., Чеботарева Н.С. Белорусская ССР и Смоленская область. Деградация валдайского и позднеледниковая история Балтийского и Белого морей // *Последний ледниковый покров на северо-западе Европейской части СССР*. М.: Наука, 1969. С. 151–176.

31. Салов И.Н. Граница максимального распространения ледников московской стадии и валдайского оледенения Белоруссии и Смоленской области и их краевые образования // Краевые образования материковых оледенений. М.: Наука, 1972. С. 145–154.
32. Козлов В.Б., Малаховский Д.Б. Об особенностях распространения льда в краевой зоне последнего оледенения в пределах Центра России // Природные ресурсы и экологические проблемы Смоленской области и смежных регионов / мат-лы науч.-практ. конф. к 100-летию проф. Д.И. Погуляева. Смоленск: 1995. С. 102–107.
33. The National Aeronautics and Space Administration (NASA): <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
34. Japan Aerospace Exploration Agency: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
35. German Aerospace Center (DLR): <https://tandemx-science.dlr.de>.
36. The Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu>.
37. Информационные ресурсы ВСЕГЕИ: http://www.vsegei.ru/ru/info/catalog_ggk/
38. Smith M., Rose J., and Booth S. Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: An evaluation of the principal data sources and an assessment of their quality // *Geomorphology*. 2006. Vol. 76. P. 148–165.
39. Greenwood S., Clark C., and Hughes A. Formalising an inversion methodology for reconstructing ice-sheet retreat patterns from meltwater channels: application to the British Ice Sheet // *Journal of Quaternary Sci.* 2007. Vol. 22. P. 637–645.
40. Гуделус В.К. К вопросу о терминологии и классификации краевых ледниковых образований материкового оледенения // Труды комис. по изуч. четвертич. периода. 1963. № 21. С. 84–91.
41. Раукас А., Ряхни Э., Миудел А. Краевые ледниковые образования северной Эстонии. Таллин: Ин-т геологии АН ЭССР, 1971. 226 с.
42. Bennett M. and Glasser N. *Glacial geology: ice sheets and landforms*. Second edition. Oxford, Wiley-Blackwell. 2009. 385 p.
43. Басаликас А.Б. О разновидностях конечных морен, встречаемых на территории Литвы // Труды комис. по изуч. четвертич. периода. 1963. № 21. С. 99–112.
44. Каплянская Ф.А., Тарноградский В.Д. Гляциальная геология: Методическое пособие по изучению, ледниковых образований при геологической съемке крупного масштаба. СПб: Недра, 1993. 328 с.
45. Асеев А.А. Древние материковые оледенения. М: Наука, 1974. 319 с.
46. Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Springer. 2011. 463 p.
47. Краевые образования материковых оледенений. М.: Наука, 1972. 333 с.
48. Асеев А.А., Маккавеев А.Н. Гляциальная геоморфология. Итоги науки и техники. Серия Геоморфология. Т. 4. М.: ВИНТИ, 1976. 177 с.
49. Karabanov A.K. and Matveyev A.V. The Pleistocene glaciations in Belarus // *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology – a Closer Look. Developments in Quaternary Sci.* Vol. 15. / J. Ehlers, P.L. Gibbard, and P.D. Hughes. Amsterdam: Elsevier, 2011. P. 29–35.
50. Величко А.А., Фаустова М.А., Писарева В.В., Карпукхина Н.В. История Скандинавского ледникового покрова и окружающих ландшафтов в Валдайскую ледниковую эпоху и начале голоцена // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 391–416.
51. ГОСТ 28441-99. “Картография цифровая. Термины и определения”.

Methodological Aspects of Glaciomorphological Mapping in the Marginal Zone of the Southeastern Sector of the Last Scandinavian Ice Sheet

N. V. Karpukhina^{a, #} and O. S. Sizov^{b, c}

^a Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

^b Institute of Oil and Gas Problems RAS, Moscow, Russia

^c Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

[#] E-mail: natalia_karpukhina@mail.ru

Glaciomorphological mapping is one of the main methods for studying the structure and dynamic of the former ice sheets, which has been developing actively in recent decades in connection with using remote sensing data for mapping landforms. Open databases of glacial landforms began to appear, which creates a prerequisite for a better understanding of the gla-

cial morpholithogenesis and the construction of detailed paleoglaciological reconstructions. Such databases have not been developed in Russia yet because of the lack of studies in the field of small scale glaciomorphological mapping. During our investigations in the test area situated in the marginal zone of the south-east part of the last Scandinavian ice sheet, methodological aspects detail glaciomorphological mapping were developed. It was found that in forested areas available digital elevation models are suitable exclusively for medium-scale mapping, but in non-forested terrains they may be used for small-scale mapping. Based on our results, we propose a number of reliable morphological indicators of glacial landforms that were used to compile the glaciomorphological map of the test area. It has been established that in forested areas, it is not possible to identify isometric positive landforms isometric negative landforms are well expressed in all kinds of landscape. Elongated landforms may be distinguished more confidently than isometric, regardless of the degree of forest cover. Results of glaciomorphological mapping of the study area will form the basis for the geodatabase which is going to be expanded to the entire Russian sector of the marginal zone of the Scandinavian ice sheet of the Late Valdai (Ostashkov) glaciation.

Keywords: Glaciomorphological mapping, Scandinavian Ice Sheet, Late Valdai, remote sensing data, digital elevation models (DEM)

ACKNOWLEDGMENTS

Field work were funded by RSF No. 17-17-01289 (Smolensky district, Smolensk region) and RFBR according to the research project No. 17-05-01033 (the rest of the territory). Mapping was carried out as part of the topic of state assignment No. 0148-2019-0005. Authors thank S.S. Bricheva and V.M. Matasov for materials of the geodetic survey and two anonymous reviewers for their valuable comments. Special attention was paid to the analysis of DEM in this article. WorldDEM (TanDEM-X) data were kindly provided by the German Aerospace Center (DLR) within the proposal ID: DEM_GEOL1527.

REFERENCES

1. Hollingworth S. Glaciation of western Edenside and adjoining areas and the drumlins of the Edenside and Solway Basin. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*. 1931. No. 87. P. 281–359.
2. *Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniiu i geologicheskoi semke chetvertichnykh otlozhenii* (Guidelines for the study and geological survey of Quaternary deposits). Moscow: 1955. 486 p.
3. Chebotareva N.S., Nedoshivina M.A., and Stolyarova T.I. *Moskovsko-valdaiskie (mikulinskie) mezhljednkovye otlozheniya v basseine Verkhnei Volgi i ikh znachenie dlya paleogeografii* (Moscow-Valdai (MIS 5-e) interglacial deposits in the Upper Volga basin and their significance for paleogeography). *Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda* (Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary). 1961. No. 26. P. 35–49. (in Russ.)
4. Prest V., Grant D., and Rampton V. Glacial map of Canada. Geological Survey of Canada. 1968. Map 1253A.
5. Faustova M.A. *Rel'ef i otlozheniya Lovatskoi lopasti poslednego lednikovogo pokrova* (Landforms and deposits of the Lovatskaya lobe of the last Ice sheet). PhD thesis. M.: IGRAN (Publ.), 1972. 208 p.
6. Punkari M. Glacial geomorphology and dynamics in the eastern parts of the Baltic Shield interpreted using Landsat imagery. *Photogrammetric Journal Finland*. 1982. No. 9. P. 77–93.
7. Clark C. Reconstructing the evolutionary dynamics of former ice sheets using multitemporal evidence, remote sensing and GIS. *Quaternary Science Reviews*. 1997. No. 16. P. 1067–1092.
8. Kleman J., Hättestrand C., Borgström I., and Stroeven A. Fennoscandian palaeoglaciology reconstructed using a glacial geological inversion model. *Journal of Glaciology*. 1997. No. 43. P. 283–299.
9. Clark C., Evans D., Khatwa A., Bradwell T., Jordan C., Marsh S., Mitchell W., and Bateman M. Map and GIS database of glacial landforms and features related to the last British ice sheet. *Boreas*. 2004. No. 33. P. 359–375.
10. Evans D., Clark C., and Mitchell W. The last British Ice Sheet: A review of the evidence utilised in the compilation of the Glacial Map of Britain. *Earth-Science Reviews*. 2005. Vol. 70. No. 3. P. 253–312.
11. Sharpe J., Sharpe D., and Harris J. A flowline map of glaciated Canada based on remote sensing data. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2010. No. 47. P. 89–101.

12. Atkinson N., Utting D., and Pawley S. Landform signature of the Laurentide and Cordilleran ice sheets across Alberta during the last glaciation. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2014. Vol. 51. No. 12. P. 1067–1083. DOI: 10.1139/cjes-2014-0112
13. Glasser N., Jansson K., Harrison S., and Kleman J. The glacial geology and Pleistocene history of South America between 38°S and 56°S. *Quaternary Science Reviews*. 2008. No. 27. P. 365–390.
14. The BRITICE Glacial Mapping Project: version two release, 2017: <https://shefuni.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=fd78b03a74bb477c906c5d4e0ba9abaf>
15. Glacial Landforms of Alberta, Canada: <https://ags-aer.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1&layers=dde978e052d440cd9ab406b1e0398377>
16. Norris S.L., Margold M., and Froese D.G. Glacial landforms of northwest Saskatchewan. *Journal of Maps*. 2017. Vol. 13. No. 2. P. 600–607. DOI: 10.1080/17445647.2017.1342212
17. *Karta chetvertichnykh obrazovaniy masshtaba 1:2500000 territorii Rossiiskoi Federatsii. Poyasnitelnaya zapiska*. (Map of Quaternary deposits 1:2500000 scale on the territory of the Russian Federation. Explanatory note). 2010. 220 p.
18. Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., and Chuyko M. Glaciomorphological Map of the Russian Federation. *Quaternary International*. 2015. Vol. 420. P. 4–14.
19. Hättstrand C. and Clark C. The glacial geomorphology of Kola Peninsula and adjacent areas in Murmansk Region, Russia. *Journal of Maps*. 2006. Vol. 6. P. 30–42.
20. Kalm V. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea. *Quaternary Science Reviews*. 2012. Vol. 44. P. 51–59.
21. Fredin O., Rubensdotter L., Welden A., Larsen E., and Lysa A. Distribution of ice marginal moraines in NW Russian. *Journal of Maps*. 2012. Vol. 8. P. 236–241.
22. Karpukhina N.V. *Osobennosti degradatsii ostashkovskogo lednikovogo pokrova v predelakh Chudsko-Pskovskoi nizmennosti* (Characteristic features of the Ostashkov Ice Sheet degradation within Chudsko-Pskovskaya lowland). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2013. No. 4. P. 38–47. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2013-4-38-47>
23. Sudakova N.G., Karpukhin S.S., and Altynov A.E. *Paleogeograficheskie rekonstruktsii lednikovyykh morfologostrukturnykh Podmoskov'ya s ispol'zovaniem kosmicheskoi informatsii* (Paleogeographic reconstructions of glacial morpholithogenic structures in the Moscow region based on satellite imagery). *Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda* (Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary). 2015. No. 74. P. 76–89. (in Russ.)
24. Sizov O.S. *Diskussionnye voprosy aktualizatsii metodiki srednemashtabnogo geomorfologicheskogo kartografirovaniya (na primere p-ova Yamal)* (Debatable issues of the methodology actualization of medium-scale geomorphological mapping: the Yamal peninsula case study). *Problemy regional'noi ekologii*. 2018. No. 5. P. 172–179. (in Russ.). DOI: 10.24411/1728-323X-2018-15172
25. Barr I. and Clark D. Distribution and pattern of moraines in Far NE Russia reveal former glacial extent. *Journal of Maps*. 2009. Vol. 5. P. 186–193.
26. *Struktura i dinamika poslednego lednikovogo pokrova Evropy* (The structure and dynamics of the last ice sheet of Europe). N.S. Chebotareva (Ed.). M.: Nauka (Publ.), 1977. 144 p.
27. *Moskovskii lednikoviy pokrov Vostochnoi Evropy* (Moscow ice sheet of Eastern Europe). M.: Nauka (Publ.), 1982. 239 p.
28. Velichko A., Faustova M., Pisareva V., Gribchenko Yu., Sudakova N., and Lavrentiev N. Glaciations of the East European Plain: distribution and chronology. *Quaternary Glaciations: a Closer Look* (Developments in Quaternary Science). 2011. 15. P. 337–359.
29. Breslav S.L. *Chetvertichnaya sistema* (Quaternary system). *Geologiya SSSR*. Vol. IV. M.: Nedra (Publ.), 1971. P. 489–636. (in Russ.)
30. Faustova M.A., Chebotareva N.S. *Belorusskaya SSR i Smolenskaya oblast'. Degradatsiya valdaiskogo oledeneniya i pozднеlednikovaya istoriya Baltiiskogo i Belogo morei* (Belorussian SSR and Smolensk region. Degradation of the Valdai and Late Glacial History of the Baltic and White Seas). *Poslednii lednikoviy pokrov na severo-zapade Evropeiskoi chasti SSSR*. (The last Ice Sheet on the north-west of the Europe part of USSR). M.: Nauka (Publ.), 1969. P. 151–176. (in Russ.)
31. Salov I.N. *Granitsa maksimalnogo rasprostraneniya lednikov moskovskoi stadii i valdaiskogo oledeneniya Belorussii i Smolenskoj oblasti i ikh kraevye obrazovaniya* (The boundary of the maximum spread of glaciers of the Moscow stage and the Valdai glaciation of Belarus and the Smolensk region and their marginal formations). *Kraevye obrazovaniya materikovyykh oledeneni*. M.: Nauka (Publ.), 1972. P. 145–154. (in Russ.)
32. Kozlov V.B. and Malakhovsky D.B. *Ob osobennostyakh rasprostraneniya l'da v kraevoy zone poslednego oledeneniya v predelakh Tsentra Rossii* (On the peculiarities of the distribution of ice in the mar-

- ginal zone of the last glaciation within the center of Russia). In: *Prirodnye resursy i ekologicheskie problemy Smolenskoj oblasti i smezhnykh regionov. Scientific conference*. Smolensk. 1995. P. 102–107. (in Russ.)
33. The National Aeronautics and Space Administration (NASA): <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
 34. Japan Aerospace Exploration Agency: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
 35. German Aerospace Center (DLR): <https://tandemx-science.dlr.de>.
 36. The Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu>.
 37. Information resources of VSEGEI: http://www.vsegei.ru/ru/info/catalog_ggk/
 38. Smith M., Rose J., and Booth S. Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: An evaluation of the principal data sources and an assessment of their quality. *Geomorphology*. 2006. Vol. 76. P. 148–165.
 39. Greenwood S., Clark C., and Hughes A. Formalising an inversion methodology for reconstructing ice-sheet retreat patterns from meltwater channels: application to the British Ice Sheet. *Journal of Quaternary Science*. 2007. Vol. 22. P. 637–645.
 40. Gudelis V.K. *K voprosu o terminologii i klassifikatsii kraevykh lednikovyx obrazovaniy materikovogo oledeneniya* (On the issue of terminology and classification of the glacial formations of the continental glaciation). *Trudy komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 1963. No. 21. P. 84–91. (in Russ.)
 41. Raukas A., Rähni E., and Miidel A. *Kraevyye lednikovyye obrazovaniya severnoi Estonii* (Marginal glacial formations in North Estonia). Tallinn. 1971. 226 p.
 42. Bennett M. and Glasser N. *Glacial geology: ice sheets and landforms*. Second edition. Oxford, Wiley-Blackwell, 2009. 385 p.
 43. Basalikas A.B. *O raznovidnostyakh konechnykh moren, vstrechaemykh na territorii Litvy* (On the varieties of finite moraines found on the territory of Lithuania). *Trudy komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 1963. No. 21. P. 99–112. (in Russ.)
 44. Kaplyanskaya F.A. and Tarnogradskiy V.D. *Gliatsialnaya geologiya: Metodicheskoe posobie po izucheniyu lednikovyx obrazovaniy pri geologicheskoi s'emke krupnogo masshtaba* (Glacial geology: A methodological guide for the study of glacial formations during large-scale geological surveys). Saint-Petersburg: Nedra (Publ.), 1993. 328 p.
 45. Aseev A.A. *Drevnie materikovyye oledeneniya* (Ancient continental glaciations). M.: Nauka (Publ.), 1974. 319 p.
 46. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Singh V.P., Singh, P., and Haritashya U.K. Ed. Springer. 2011. 463 p.
 47. *Kraevyye obrazovaniya materikovyx oledeneniya* (Marginal formations of continental glaciations). M.: Nauka (Publ.), 1972. 333 p.
 48. Aseev A.A. and Makkaveev A.N. *Gliatsialnaya geomorfologiya*. (Glacial geomorphology). *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Geomorfologiya*. Vol. 4. M.: VINITI (Publ.), 1976. 177 p.
 49. Karabanov A.K. and Matveyev A.V. The Pleistocene glaciations in Belarus. Quaternary Glaciations – Extent and Chronology – a Closer Look. Developments in Quaternary Sciences. Vol. 15. J. Ehlers, P.L. Gibbard, and P.D. Hughes. Ed. Amsterdam: Elsevier, 2011. P. 29–35.
 50. Velichko A.A., Faustova M.A., Pisareva V.V., and Karpukhina N.V. *Istoriya Skandinavskogo lednikovogo pokrova i okruzhaiushchih landshaftov v Valdaiskuyu lednikovuyu epokhu i nachale golocena* (History of the Scandinavian ice sheet and surrounding landscapes during Valday ice age and the Holocene). *Led i Sneg*. 2017. Vol. 57. No. 3. P. 391–416. (in Russ.). doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-391-416
 51. GOST 28441-99. “Kartografiya tsifrovaya. Terminy i opredeleniya” (The regional standard adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification of the Commonwealth of Independent States 28441-99).