

УДК 551.435.42(476)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЛОЖЕ ПОСЛЕДНЕГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДНИКОВЫХ ЛОЖБИН БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ

М. Е. КОМАРОВСКИЙ¹⁾, Е. В. ХИЛЬКЕВИЧ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

На ложе Поозерского (Вислинского) ледникового покрова, занимавшего северную часть Беларуси в максимальную стадию и в начале деградации, по геологическим и геоморфологическим критериям выделены три концентрические термические зоны: внешняя зона базально-мерзлого льда, зона прерывистого мерзлого ложа, внутренняя зона талого ложа. Сопоставление ледниковых ложбин с термической зональностью показывает, что их распределение и формирование тесно связаны с термическими условиями. В ходе проникновения в северную часть Беларуси Поозерского (Вислинского) ледникового покрова термическая зональность сказалась на геологических денудационных процессах. Это привело к развитию локальной эрозии и формированию небольшого количества ложбин во внешней зоне базально-мерзлого льда, масштабному проявлению ледникового выпаживания и выдавливания и образованию лопастных гляциодепрессий, крупных радиальных ложбин и подледных озер во внутренней зоне талого ложа и вдоль ее внешней границы с зоной прерывистого мерзлого ложа. Оформление крупных субгляциальных водно-эрозионных ложбин стало возможным на этапе деградации ледникового щита (в витебскую фазу), после того как талые ледниковые воды подледных подпружных озер нашли выход в краевую зону через прерывистое мерзлое ложе и были спущены в результате катастрофических выбросов по отдельным каналам, которые углубились, расширились и образовали ложбины.

Ключевые слова: ледниковые ложбины; краевая зона; базальные термические условия; талое ложе; мерзлое ложе; последний ледниковый покров.

Образец цитирования:

Комаровский М.Е., Хилькевич Е.В. Влияние термических условий в ложе последнего ледникового покрова на распределение ледниковых ложбин Белорусского Поозерья. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2022;1:101–115.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-1-101-115>

For citation:

Komarovskiy ME, Khilkevich EV. Influence of the thermal conditions within the bed of the last ice sheet on the distribution of glacial valleys of the Belarusian Poozerie area. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2022;1:101–115. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-1-101-115>

Авторы:

Михаил Евгеньевич Комаровский – кандидат геолого-минералогических наук, доцент; доцент кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.
Екатерина Викторовна Хилькевич – старший преподаватель кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Michail E. Komarovskiy, PhD (geology and mineralogy), doцент; associate professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.
mkomarovskiy@mail.ru
Ekaterina V. Khilkevich, senior lecturer at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.

INFLUENCE OF THE THERMAL CONDITIONS WITHIN THE BED OF THE LAST ICE SHEET ON THE DISTRIBUTION OF GLACIAL VALLEYS OF THE BELARUSIAN POOZERIE AREA

M. E. KOMAROVSKIY^a, E. V. KHILKEVICH^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: M. E. Komarovskiy (mkomarovskiy@mail.ru)

Within the bed of the Poozerie (Weichselian) ice sheet, which occupied the northern part of Belarus at the maximum stage and at the beginning of degradation, three concentric thermal zones were identified according to geological and geomorphological criteria: the outer zone of basal frozen ice, the zone of discontinuous frozen bed, the inner zone of the thawed bed. Comparison of glacial valleys with thermal zoning shows that their distribution and formation closely related to thermal conditions. During the Poozerie (Weichselian) ice sheet advance into the northern region of Belarus, thermal zoning affected geological denudation processes. This led to local erosion and valleys in the outer zone of basal frozen ice, large-scale manifestation of glacial excavation and squeezing out and the formation of lobate glacial depressions, large radial valleys and subglacial lakes in the inner zone of the thawed bed and along its outer border with the zone of discontinuous frozen bed. The formation of large tunnel valleys became possible at the stage of degradation of the ice sheet (Vitebsk phase), after the melted glacial waters of subglacial dammed lakes found an outlet into the marginal zone through an intermittent frozen bed and were released as a result of catastrophic floods through separate channels, which were deepened, widened and formed tunnel valleys.

Keywords: glacial valleys; marginal zone; basal thermal conditions; thawed ice bed; frozen ice bed; the last ice sheet.

Введение

Ледниковая эрозия и формирование ледниковых ложбин строго зависят от термических условий в ложе ледника. В частности, мерзлое или талое состояние ложа контролирует прочность сцепления лед – ложе, которое влияет на динамику ледника и процессы в его ложе [1]. В условиях талого состояния ложа водная пленка и высокое водное давление снижают сцепление лед – ложе, приводя к скольжению ледника, проявлению абразии и выпахивания. В базально-холодных условиях ледник прочно смерзается со своим ложем, движется за счет внутренней деформации льда, и разрушение субстрата может не происходить. Вопрос пространственной организации базальных термических зон в ледниковом покрове имеет фундаментальное значение для распределения и формирования ледниковых ложбин.

Предыдущими исследованиями установлено, что Поозерский ледниковый покров является политермальным ледником, у которого отмечается определенная зональность базальных термических условий. Общая картина распределения базально-холодных и базально-теплых условий внизу Скандинавского ледникового щита в Северной Европе в настоящее время в целом известна [2]. Кратко подытожим основные результаты изучения проявления ледниковой термической зональности в субгляциальных эрозионных процессах, важные для понимания формирования ледниковых ложбин в Беларуси.

1. Ледниковые ложбины связаны преимущественно с тальми зонами – внутренней (под центром ледникового щита) и внешней (в пределах периферического покрова) [3]. Термические условия внутренней талой зоны, благоприятствующие массовому развитию плакинга и абразии, привели к возникновению полосы крупнейших экзарационных впадин и ложбин, окаймляющих Балтийский кристаллический щит [4]. Для внешней талой зоны более характерными считаются процессы выпахивания (плакинг, сквамация), аккреция режеляционного льда, деформация ложа и образование лопастных и языковых экзарационно-протрузионных гляциодепрессий и ложбин, сопряженных с полосами развития друмлинов, конечных и радиальных напорных морен.

2. Крупные подледные водно-эрозионные ложбины проявляются в краевой мерзлой зоне. Здесь сложились условия для эпизодического дренажа подледных вод от базально-теплых районов, расположенных внутри ледника [5].

3. В районах с расчлененным рельефом политермический ледниковый покров имеет тенденцию образовывать базально-холодные зоны над поднятиями, сохраняя тем самым высоко приподнятые ландшафты, и базально-теплые эрозионные зоны в топографических понижениях, где лед является наиболее мощным. Рельеф всегда вызывает самоустанавливающуюся и довольно устойчивую базальную вертикальную термическую зональность – механизм, работающий на местности с малой (несколько сотен метров) амплитудой рельефа [6].

Однако намного меньше известно о закономерностях термозонального контроля субгляциальных эрозионных процессов в основной краевой зоне Поозерского ледникового покрова, к которой относится северная часть Беларуси. Неопределенными остаются конкретная ширина той или иной зоны, форма в плане, последовательность зон, их соотношение с ледниковыми потоками и рельефом.

Целями данной работы являются: 1) исследование базальных термических условий под краевой зоной Поозерского ледникового покрова на севере Беларуси; 2) установление основных черт проявления термической зональности в базальных эрозионных процессах и распределении ледниковых ложбин.

Методика реконструкции термических условий

Реконструкция термических условий под Поозерским ледниковым покровом проводилась для максимальной стадии и начальной регрессивной (витебской) фазы оледенения в северной части Беларуси. В работе не рассматриваются район Белорусского Поозерья на крайнем северо-западе страны (Озерская низина) и браславская стадия оледенения со своим узором ледниковых лопастей, языков и свойственных им ложбин вместе с новыми термическими условиями под ледником.

Для выявления термических условий и последовательности их смены под ледниковым покровом использовался комплекс геологических и геоморфологических критериев, включающих отложения, гляциотектонические структуры, гляциодислокации, формы и типы рельефа, которые можно интерпретировать по установленным связям с процессом их формирования. Исходя из имеющихся данных, по состоянию базального льда эти геологические и геоморфологические образования можно свести к трем группам. Первая группа включает отложения, структуры и формы рельефа, связанные с мерзлым ложем, вторая – с талым ложем, эрозией, аккумуляцией и изменениями основания ледника, третья группа проявляется в переходных условиях между мерзлым и талым ложем (прерывисто-мерзлое ложе). Эти образования зонально распределены по радиусу ледникового покрова (см. таблицу).

Геологические и геоморфологические критерии термических условий в основании краевой зоны последнего ледникового покрова в Беларуси

Geological and geomorphological criteria of thermal conditions in a base of the marginal zone of the last ice sheet in Belarus

Термические условия	Зона в леднике	Геологические критерии	Геоморфологические критерии
Базально-холодный лед	Зафронтальная	1. Древние палеогеновые коры выветривания на девонских доломитах и известняках 2. Рыхлые неогеновые буроугольные и песчано-глинистые отложения	1. Доледниковые формы субаэрального выветривания и флювиальной эрозии без знаков ледниковой эрозии: денудационные поверхности выравнивания палеогенового времени, выступы скальных пород, длинные пологие склоны, карстовые воронки, флювиальные палеодолины неогенового возраста 2. Прогляциальные латеральные ложбины стока 3. Холмистый моренный рельеф в центральных районах ледораздельных возвышенностей
	Краевая	1. Гидроразрывные интрузивные дайки и силлы 2. Чешуи из песка и гравия в напорных моренах 3. Плоскости надвигов и складок в гляциодислокациях 4. Лежачие и S-образные складки, разрывы, песчаные линзы, слои и отторженцы в морене	1. Напорные конечные морены с гляциодинамическими текстурами 2. Субгляциальные озы 3. Холмистые контролируемые морены 4. Супрагляциальные озы и дельты

Термические условия	Зона в леднике	Геологические критерии	Геоморфологические критерии
Базально-теплый лед	Зафронтальная	<ol style="list-style-type: none"> 1. Субгляциальные озерные отложения 2. Лоджемент-морена 3. Субгоризонтальные трещины, раскалывающие морену на плитки 4. Утюгообразные обломки в морене 5. Субгляциальная морена вытаявания 6. Прерывистые и искривленные слои и линзы с внутренними текстурами течения 7. Эрозионные контакты с недеформированными подморенными отложениями 8. Субгоризонтальные трещины, местами заполненные сортированными отложениями 9. Морена, содержащая горизонтальные песчаные слои миллиметровой толщины, переслаивающиеся с моренной матрицей 10. Одинарные прослои стратифицированного песка в моренной матрице 11. Деформационная морена 12. Сильно вытянутые, смятые и будинизированные слои подморенных отложений, сланцеватость в морене 13. Валунные мостовые в морене 14. Гляциотектонические чешуи и складки в слоистых отложениях, содержащих слои контрастной реологии и водопроницаемости 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Моренные равнины 2. Линейные формы: озы, U-образные ложбины 3. Элементарные конечные морены, сформированные повторными подвижками 4. Краевые валы субгляциальной деформационной морены 5. Ложбины и котловины ледникового выдавливания 6. Напорные морены, построенные из деформированных отложений крупных приледниковых водоемов
Мозаика пятен мерзлого и талого ложа	Пограничная зона между краевой и внутренней зонами	<ol style="list-style-type: none"> 1. Чешуйчатые надвиги 2. Мощные сублимационные и абляционные морены 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Крупные напорные конечные морены 2. Холмистые контролируемые морены 3. Подледные водно-эрозионные ложбины 4. Радиальные формы напорных морен и ложбины

Отображенная в отложениях, структурах и формах рельефа запись их формирования дает информацию о состоянии фазовой границы между водой и льдом у основания ледника, т. е. о базальной температуре [7]. Образования, отражающие прошлые базально-холодные условия, распространены вдоль южной границы ледника. На условия базально-холодной маргинальной зоны указывают латеральные и прогляциальные водно-ледниковые долины, где краевые ледниковые аккумуляции отсутствуют. Такие долины развивались вдоль края лопастей и языков в максимальное их расширение в ответ на утончение льда и сопутствующее рассеяние геотермального тепла. В базально-холодной зоне формировались также грядово- и холмисто-моренные пояса и связанные с ними латеральные и прогляциальные долинные системы [8]. Важные элементы внутренней структуры – чешуи, лежащие и S-образные складки, отторженцы из песка, гравия в морене – являются доказательством деформации отложений в мерзлом состоянии (рис. 1).

Ледниковые формы рельефа, находящиеся глубоко позади края Поозерского ледника, – моренные равнины, озы, лопастные и языковые котловины, краевые валы субгляциальной деформационной морены – ограничивают базально-теплый лед. Такие геологические образования, как подморенные гляциотектониты, будинизированные слои подстилающих отложений, сланцеватость в морене, слоистая морена с прослоями отсортированных отложений, отчетливый контакт между основной мореной и субстратом, диапиры, свидетельствуют об условиях талого ложа (рис. 2), а отложения подледных озер, представленные только здесь, прямо указывают на присутствие крупных скоплений талых ледниковых вод.

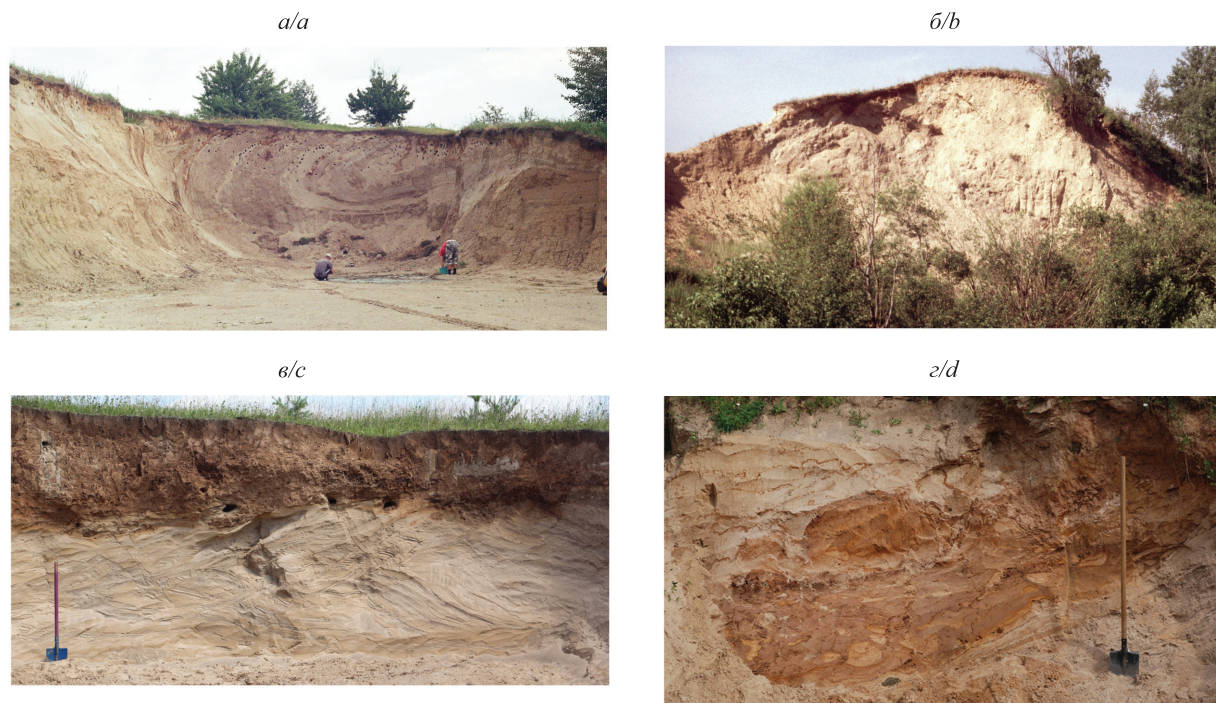


Рис. 1. Гляциотектонические структуры, связанные с деформацией конечных морен в мерзлом состоянии у южного края Поозерского (Вислинского) ледника в максимальную стадию в Беларуси:

- a* – лежачие изоклинали складки в песчаных и моренных слоях (северный склон Гродненской возвышенности);
- б* – чешуи из песка и гравия (Черейская гряда); *в* – опрокинутые песчаные складки (восточная часть Ушачской возвышенности);
- г* – гляциотектонический меланж с песчаными отторженцами (северо-западная часть Ушачской возвышенности)

Fig. 1. Glaciotectonic structures associated with deformation of push moraines in frozen state at southern margin of the Poozerie (Weichselian) ice sheet during the Last Glacial Maximum in Belarus:

- a* – recumbent isoclinal sand and till folds (northern slope of the Grodno Highland);
- b* – slices (blocks) of sand and gravel (Chereya Ridge);
- c* – recumbent folds within of sand (eastern part of the Ushachi Highland);
- d* – glaciotectonic melange with sand intraclasts (northwestern part of the Ushachi Highland)

Посередине между внешней и внутренней зонами Поозерского ледника находятся самые крупные конечно-моренные гряды, радиальные формы напорных морен, ложбины, отторженцы и гляциодислокации, отражающие переходные условия между теплым и холодным льдом (частично мерзлое ложе). Конечно-моренные формы, гляциодислокации и отторженцы могли быть связаны с появлением фронтальных зон сжатия и надвигов в леднике под районом термального перехода [9]. Через эти конечно-моренные системы простираются многочисленные ложбины водно-ледникового размыва, по которым мы заключаем, что здесь в большом количестве существовали каналы стока подледных вод в мерзлом ложе под ледником.

Косвенными индикаторами широкого распространения холодных базальных условий под южным краем ледникового покрова и развития вечной мерзлоты перед ним служат ископаемые перигляциальные образования (рис. 3). Они дают возможность оценить температуру грунта, глубину и ширину зоны вечной мерзлоты. К наиболее важным показателям относятся морозобойные трещины. Псевдоморфозы по крупным повторно-ледяным жилам принимаются как убедительное обоснование наличия в прошлом сплошной вечной мерзлоты [12].

Геологические и геоморфологические образования, указывающие на базально-холодное, базально-теплое и прерывисто-мерзлое ложе, были нанесены на карту масштаба 1 : 200 000 (рис. 4). По расположению этих индикаторов стало возможным реконструировать базальные термальные условия Поозерского ледникового покрова в северной части Беларуси и установить основные черты проявления термической зональности в распределении ледниковых ложбин.

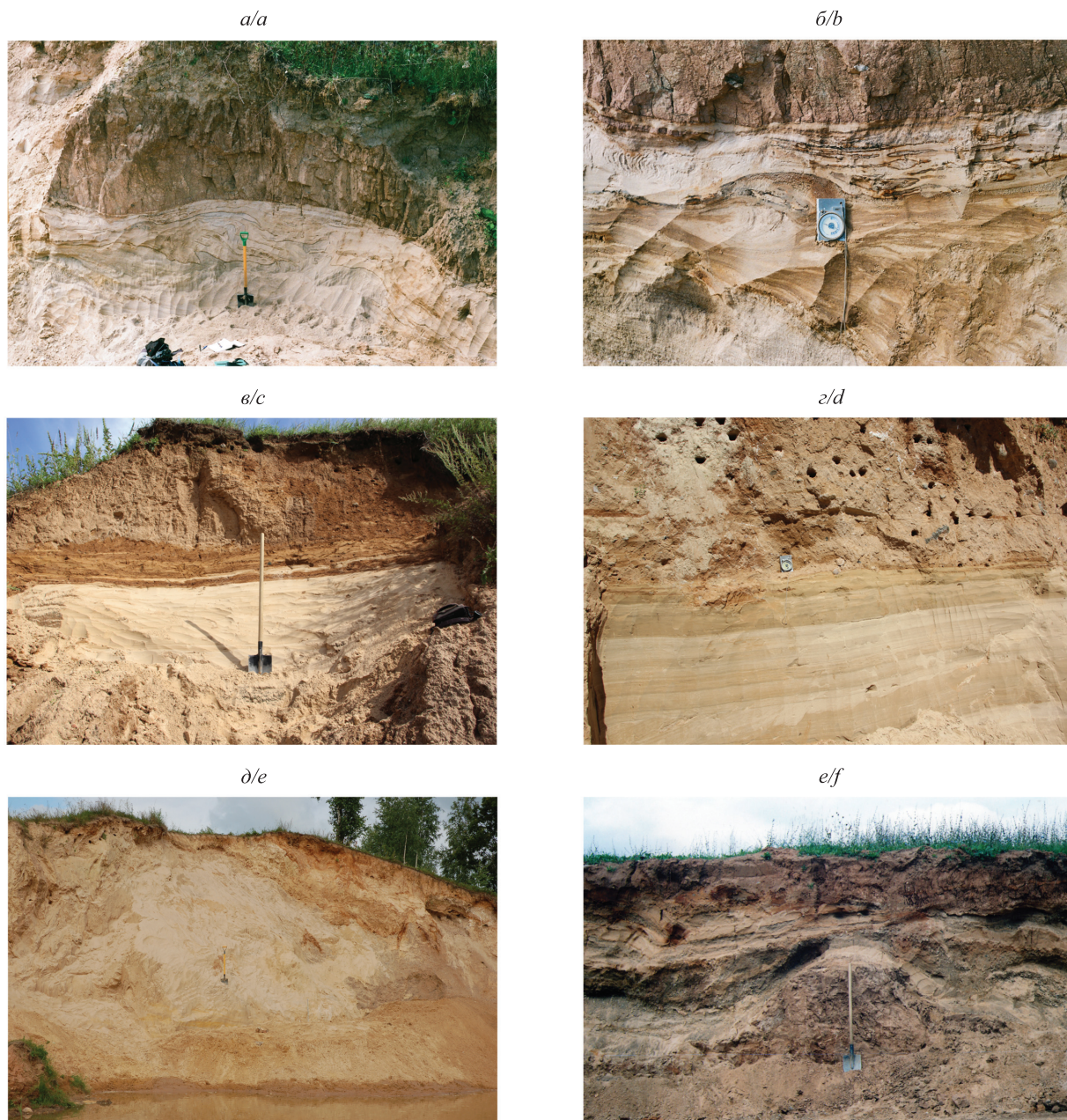


Рис. 2. Структуры, указывающие на присутствие в прошлом талого ложа позади ледникового края:
a – подморенные гляциотектониты (Гиньковская ложбина);
б – вытянутые, смятые и будинизированные слои подстилающих отложений, сланцеватость в морене (ложбина Долгое);
в – слоистая морена с прослоями отсортированных отложений (д. Старинки);
г – отчетливый контакт между основной мореной и субстратом;
д, е – диапиры, проникающие в перекрывающие слоистые отложения (район Ушачских озер)

Fig. 2. Structures indicating the former presence of thawed bed beyond the ice margin:
a – sub-till glacitectorite (the Ginkovo Valley);
b – attenuated, folded and boudinaged layers in sub-till sediments and foliation in till (the Dolgoe Valley);
c – bedded till with stringers of sorted sediments (Starinki Village);
d – sharp (erosional) contacts between till and substrate;
e, f – diapirs of sands and till squeezed into overlying stratified sediments (Ushachi Lakes Basin)

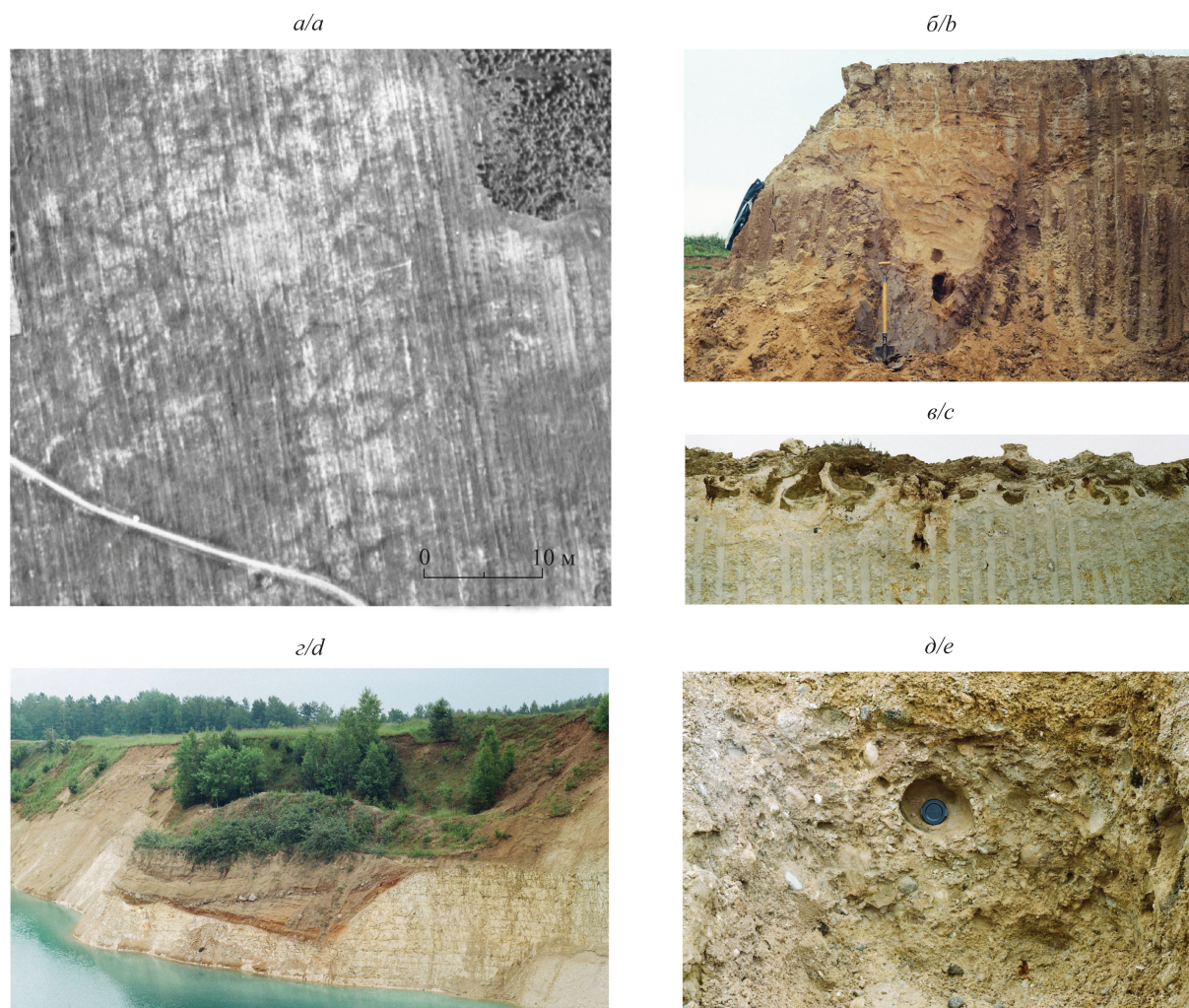


Рис. 3. Свидетельства вечной мерзлоты в последний ледниковый максимум в центральной и западной частях Беларуси:
a – реликтовые полигонально-блочные грунты
 (Центрально-Березинская равнина юго-западнее г. Березино);
б – ледяная жила в озерно-ледниковых глинистых отложениях (Скидельская низина);
в – криотурбации в моренных и меловых отложениях
 (карьер «Старавино» северо-западнее г. Гродно);
г – погребенная перигляциальная долина
 (карьер «Пышки» западнее г. Гродно);
д – желифлюкционный суглинистый диамиктон (склон долины р. Неман).
 Источник: [10; 11]

Fig. 3. Evidences for continuous permafrost during the Last Glacial Maximum in the central and western areas of Belarus:
a – relict ice wedge polygons
 (Central Berezina Plain to the southwest of Berezino);
b – ice wedge cast in lacustrine clay deposits (Skidel Lowland);
c – cryoturbations in till and chalk deposits
 (Staravino open-cast chalk mine to the northwest of Grodno);
d – periglacial valley (Pishki open-cast chalk mine to the west of Grodno);
e – jelifluction loam diamicton (slope of the Nemen River valley).
 Source: [10; 11]

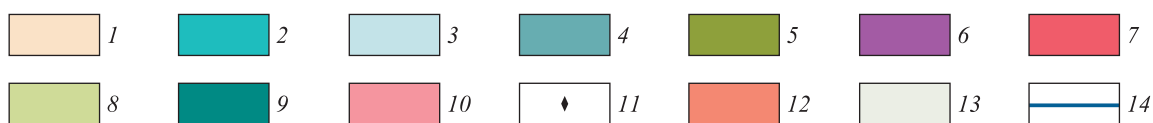
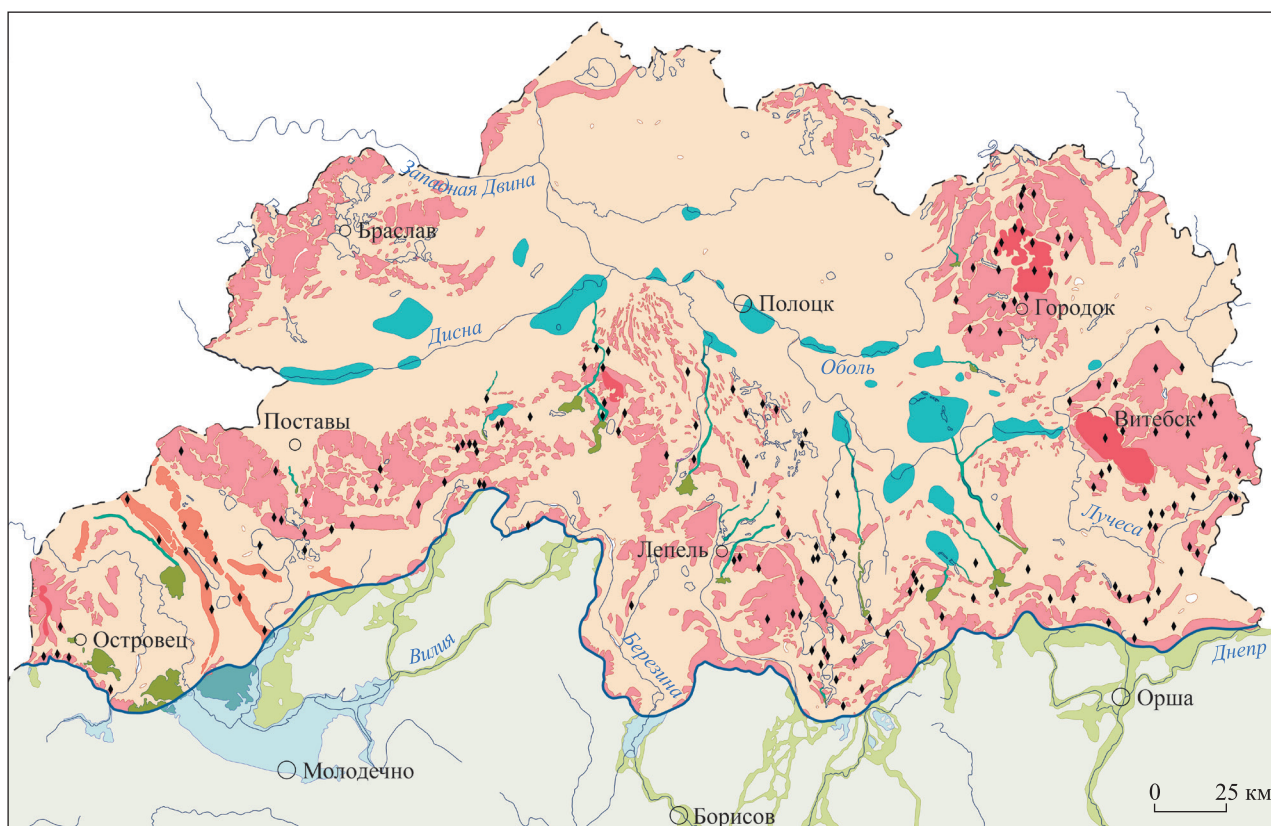


Рис. 4. Распределение образований, отражающих термические условия под краевой зоной Поозерского (Вислинского) ледникового покрова в северной части Беларуси.

Формы рельефа и отложения, указывающие на базально-теплые условия:

1 – подледные морены; 2 – отложения подледных озер; 3 – прогляциальные озера; 4 – дельты.

Образования, которые могут быть связаны с базально-холодным льдом:

5 – супрагляциальные озы и дельты в устьях подледных каналов;

6 – подледные озы; 7 – холмистый моренный рельеф;

8 – прогляциальные и латеральные водно-ледниковые долины.

Формы рельефа, отражающие переходную зону между теплым и холодным льдом:

9 – подледные водно-эрозионные ложбины; 10 – напорные конечные морены;

11 – гляциодислокации; 12 – радиальные формы напорных морен.

Остальные обозначения:

13 – зона вечной мерзлоты; 14 – максимальная граница оледенения

Fig. 4. Distribution of features marking the thermal conditions under marginal zone of the Poozerie (Weichselian) ice sheet in the northern area of Belarus.

Landforms and deposits, which may indicate warm-bed conditions:

1 – subglacial tills; 2 – sediments of subglacial lakes;

3 – ice margins along lacustrine basins; 4 – ice contact deltas.

Landforms, which can be attributed to a peripheral cold-based margin:

5 – supraglacial eskers and deltas within the tunnel channel mouths; 6 – subglacial eskers;

7 – hummocky moraine; 8 – proglacial and lateral meltwater channels.

Landforms, which perhaps reflect the warm-bed and cold-bed boundary zone:

9 – tunnel valleys; 10 – ice thrust moraines; 11 – glacetectonic structures

and detached masses; 12 – radial forms of the push moraines.

Other designations:

13 – zone of continuous permafrost; 14 – maximal ice sheet boundary

Распределение ложбин в связи с термической зональностью ледника

Пространственное распределение геологических и геоморфологических доказательств отражают три концентрические термические зоны, параллельные краю Поозерского ледника: внешняя зона мерзлого ложа, промежуточная зона прерывистого мерзлого ложа и внутренняя зона талого ложа.

Внешняя зона мерзлого ложа распространяется вдоль края ледника, является субгляциальным продолжением вечной мерзлоты и, судя по расстоянию от края ледника до окончаний субгляциальных водно-эрозионных ложбин, имеет ширину до 53 км. У Вилейской лопасти она отсутствует на границе с Вилейским прогляциальным водоемом, где мог быть талик. Ледниковые ложбины в этой зоне встречаются весьма редко, за исключением разломов [13]. Широкое развитие получили латеральные и прогляциальные каналы талых ледниковых вод с конечными напорными моренами и без них.

Зона прерывистого мерзлого ложа непрерывной полосой протягивается дальше к северу. Ее ширина изменяется от 10 до 80 км. В этой зоне сосредоточена преобладающая часть ледниковых ложбин. Мы полагаем, что появление такого множества ложбин обусловлено изменением базальных термических условий в благоприятную сторону для их формирования.

В пределах зоны прерывистого мерзлого ложа ложбины сосредоточены преимущественно в поясе термического перехода к зоне теплого льда. Считается, что зона перехода условий от скользящего теплого ложа к базально-холодным условиям способствует ледниковой эрозии (выпахиванию) и гляциотектоническому выдавливанию [14]. Это согласуется с происхождением ложбин, среди которых преобладают субгляциальные экзарационные, гляциотектонические протрузионные и гляциоинъективные формы, проявляющие генетическое родство с напорными конечными и радиальными моренами и гляциодислокациями [15]. Ложбины нередко наследуют направление осевых зон ледниковых языков и погребенных радиально вытянутых ложбин. Унаследованные формы тесно коррелируются с теплым скользящим базальным льдом.

Характерными формами рельефа зоны прерывистого мерзлого ложа являются субгляциальные водно-эрозионные ложбины, которые в таком количестве больше не встречаются ни в одной из зон (рис. 5). Они протягиваются от субгляциальных озер зоны талого ложа через зону прерывистого мерзлого ложа и имеют спереди вдоль границы с мерзлым ложем супрагляциальные водно-ледниковые конусы и озы. Блокировка мерзлым субстратом стока талых вод из ледникового ложа считается важным фактором в формировании водно-эрозионных ложбин. Частично мерзлое ложе должно усиливать подледное водное давление в водоносных пластах или подледных озерах до тех пор, пока спуски через зону прерывистого мерзлого ложа не прорезали ложбины [16; 17].

Внутренняя зона талого ложа располагается позади зоны прерывистого мерзлого ложа. Она имеет ширину до 88 км и отчетливо проявляется до краевого комплекса браславской стадии. Теплый в основании ледник и влажное ложе облегчают выпаживание, абразию и деформацию подледных отложений. Ледниковое выпаживание будет эффективнее вдоль границы с мерзлым ложем, где срыву блоков способствует водное давление в немерзлых породах [18]. В связи с этим в данной зоне доминируют лопастные и языковые экзарационно-эрозионные котловины (гляциодепрессии). Внутренняя базально-теплая зона ледника является также источником талых ледниковых вод, местом скопления 24 изолированных субгляциальных озер в ледниковых котловинах. Дренажное талых вод из субгляциальных озер к краю ледника – основная причина заложения водно-эрозионных ложбин.

В некоторых местах концентрическое распределение термических зон осложняется неровностями подледникового рельефа. Наиболее значительные изменения вносятся поднятиями в северо-восточном, центральном и северо-западном районах Беларуси, служившими ледоразделами Поозерского ледникового покрова и более древних оледенений. В таких ситуациях отмечается определенная последовательность в расположении форм рельефа и ложбин, которая может отражать изменения температурных условий и процессов эрозии в ледниковом ложе над поднятиями.

На рис. 6 показаны доледниковые и ледниковые формы и их отношение к прошлым базальным термическим условиям в пределах Витебского и Городокского поднятий поверхности дочетвертичных отложений. На самых низких высотах (до 100 м) у подножий поднятий располагаются формы ледникового выпаживания, предполагающие базальный лед у точки плавления. На средних высотах (между 100 и 140 м) на склонах поднятий характер форм смешанный: редкие ледниковые отторженцы коренных пород и ложбины свидетельствуют о локальном проявлении ледникового выпаживания и теплого льда, а более очевидные образования (останцы кор выветривания, карстовые воронки с неогеновыми отложениями и без них, фрагменты доледниковых речных долин), которые только в некоторой степени преобразованы ледниковыми процессами, подвержены базально-холодному льду. Выше 140 м поверхности вершин не содержат доказательств ледниковой эрозии и других следов гляцигенного воздействия, что свидетельствует о базально-холодном льде (рис. 7).

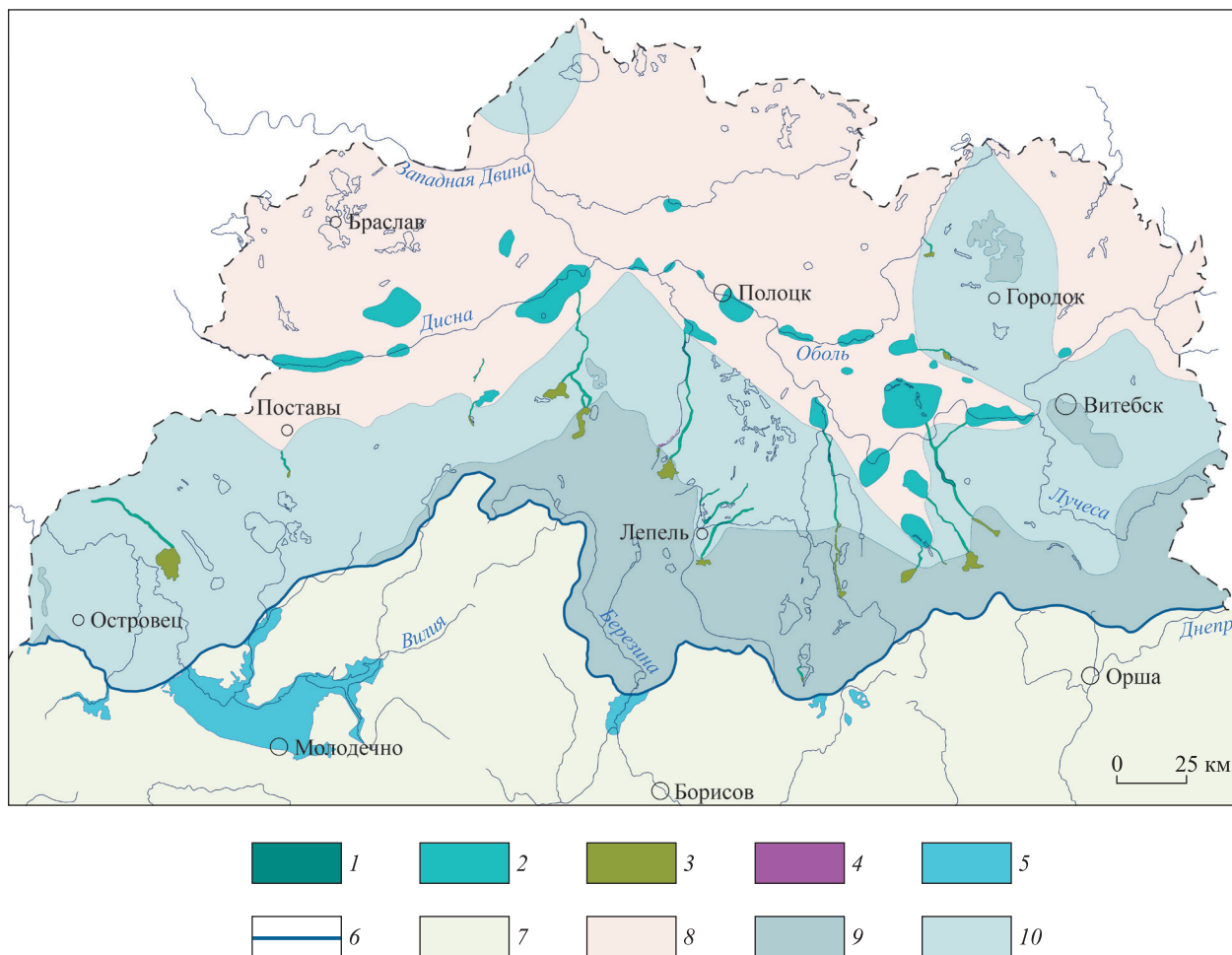


Рис. 5. Соотношение между подледными водно-эрозионными ложбинами и термическими условиями в ложе ледника, установленными по диагностическим формам рельефа и отложениям:
 1 – субгляциальные водно-эрозионные ложбины; 2 – подледные озера;
 3 – супрагляциальные озы и дельты в устьях подледных каналов;
 4 – подледные озы; 5 – приледниковые водоемы; 6 – максимальная граница оледенения;
 7 – зона вечной мерзлоты; 8 – базально-теплый лед; 9 – базально-холодный лед;
 10 – мозаика базально-холодных и базально-теплых условий

Fig. 5. Correlation between tunnel valleys and the basal thermal conditions inferred from diagnostic landforms and deposits:
 1 – tunnel valleys; 2 – subglacial lakes; 3 – supraglacial eskers and deltas within the tunnel channel mouths; 4 – subglacial eskers;
 5 – proglacial lacustrine basins; 6 – maximal ice sheet boundary;
 7 – zone of continuous permafrost; 8 – wet-based ice;
 9 – cold-based ice; 10 – mosaic of frozen-bed and thawed-bed conditions

Наличие описанного набора образований в возвышенных районах под днепровской мореной отражает высотную зональность базальных условий и распределения ложбин Ясельдинского, Березинского и Днепровского ледников, которые покрывали исследуемый район. Схожая высотная зональность встречается также на межпотоковых возвышенностях Поозерского ледникового покрова (см. рис. 5). Конечно-моренный напорный грядово-холмистый рельеф ограничен более низкими склонами возвышенностей, он отражает зону базально-талого ложа. Далее вглубь, у центра возвышенностей, холмисто-западный моренный рельеф, мощная абляционная морена, звонцеподобные и камовые холмы, водно-ледниковые долины стока и другие геолого-геоморфологические индикаторы базально-холодного ложа расположены на самых высоких отметках. В пределах Городокской возвышенности у границ между базально-теплым быстро движущимся льдом (ледниковые потоки) и базально-холодным медленно текущим льдом над ледораздельным поднятием развиты латеральные зоны срезания.

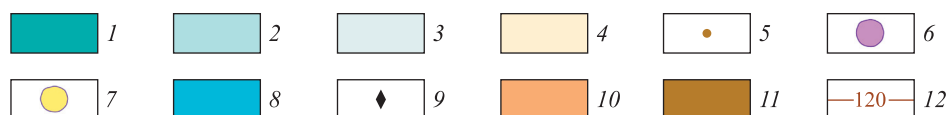
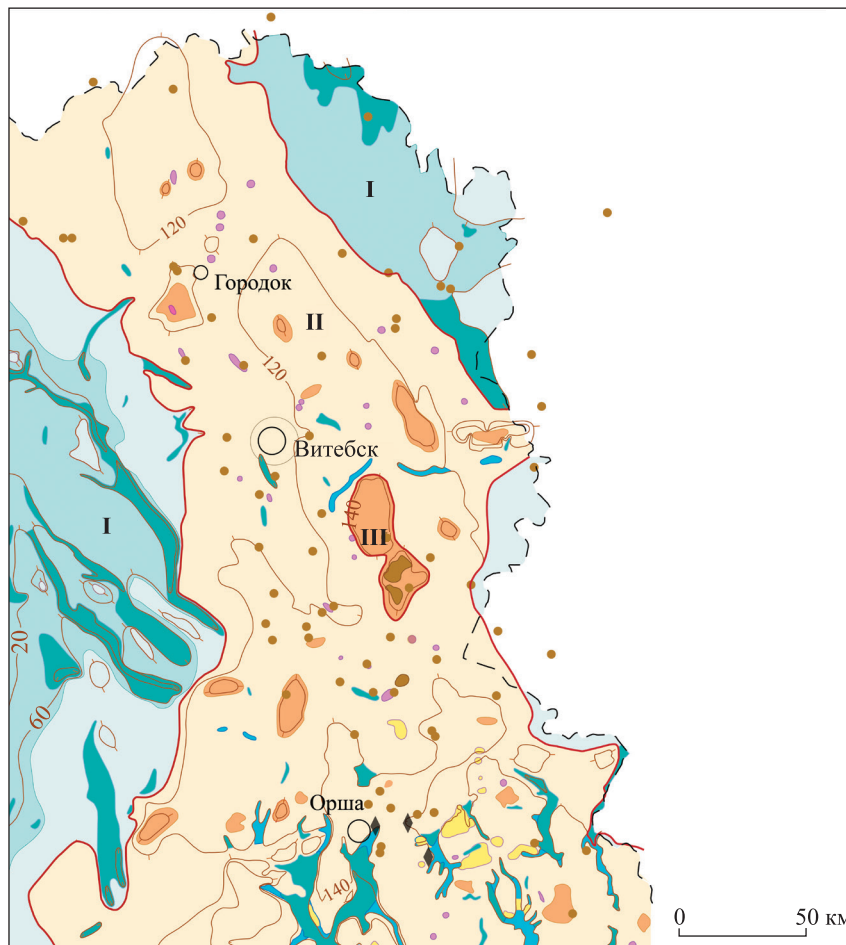


Рис. 6. Морфологическая карта Витебского и Городокского поднятий поверхности дочетвертичных отложений, показывающая доледниковые и ледниковые формы и их отношение к прошлым базальным термическим условиям.

Формы ледникового выпахивания, предполагающие базальный лед у точки плавления (I):

1 – ледниковые ложбины; 2 – гляциодепрессии; 3 – поверхности ареальной ледниковой экзарации.

Доледниковые поверхности, которые лишь в некоторой степени преобразованы ледниковыми процессами и подвержены базально-холодному льду (II):

4 – склоны возвышенностей между 100 и 140 м; 5 – останцы коры выветривания;

6 – карстовые воронки; 7 – палеокарстовые воронки

с неогеновыми отложениями; 8 – фрагменты доледниковых речных долин;

9 – ледниковые отторженцы и гляциодислокации коренных пород.

Возвышенные образования, свидетельствующие о базально-холодном льде (III):

10 – останцы доледниковой поверхности в центральных

наиболее высоких участках без знаков ледниковой эрозии; 11 – площадные коры выветривания (палеогеновый пенеппен по Исаченкову [19]) на вершинах поднятий; 12 – изогипсы

Fig. 6. Morphological map of the Vitebsk and Gorodok uplifts bedrock indicating preglacial and glacial landforms and their relation to former basal thermal conditions.

Glacial erosion landforms suggesting wet-based ice (I):

1 – glacial valleys; 2 – glacial basins; 3 – landforms of areal scouring.

Preglacial features, somewhat modified by glacial processes,

were affected by predominantly cold-based ice (II):

4 – slopes upwards between 100 and 140 m; 5 – remnants of waste mantle; 6 – sink holes;

7 – paleokarstic holes with Neogene deposits; 8 – fragments of the preglacial fluvial valleys;

9 – glacial detached masses and glaciotectionic deformations of bedrock.

Upland features suggesting a cold-based ice (III):

10 – preglacial surface remnants in the central highest parts with no sign of glacial erosion;

11 – fields of weathering crust (Paleogene peneplain after Isachenkov [19])

in the summit positions of the uplifts; 12 – contours

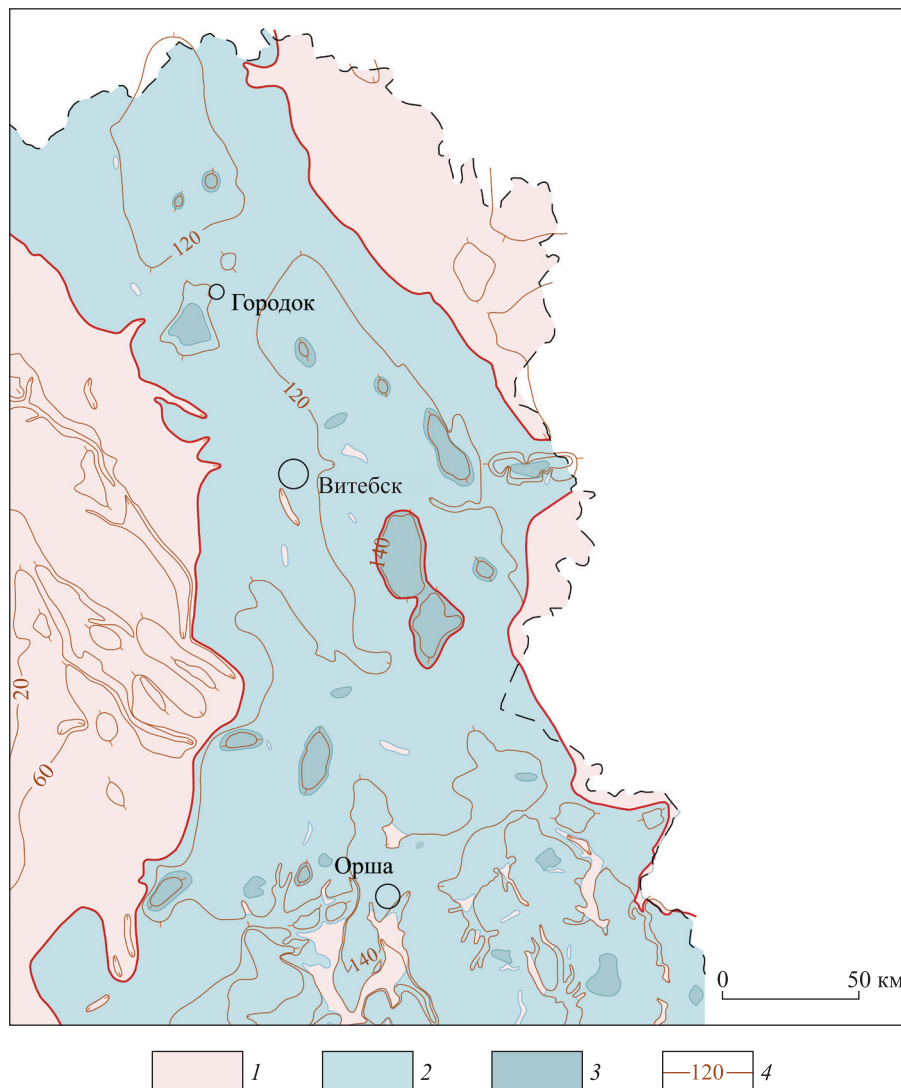


Рис. 7. Переход от районов талого ложа к районам мерзлого ложа в пределах Витебского и Городокского поднятий:

1 – районы талого ложа в окружающих депрессиях; 2 – переходная зона, где ледниковые ложбины талые, а склоны и вершины поднятий мерзлые; 3 – районы полностью мерзлого ложа на самых высоких вершинах; 4 – изогипсы

Fig. 7. The transition from thawed to frozen bed within the Vitebsk and Gorodok uplifts:

1 – areas of thawed bed in surrounding basins; 2 – the transition zone, glacial valleys remain thawed, but upland slopes and summits are frozen; 3 – zone of completely frozen bed within the highest summit; 4 – contours

Обсуждение результатов

Приведенные выше данные показывают, что распределение ледниковых ложбин подчиняется ледниковой термической зональности, которая контролирует деятельность ледника и талых ледниковых вод.

В северной части Беларуси узкая зона вдоль края Поозерского ледника во время максимальной стадии являлась холодной в основании. Базальное замораживание было связано с низкими температурами на поверхности и небольшой мощностью льда. На холодные климатические условия у края ледника указывают морозобойные клинья, крупномасштабные полигональные грунты и другие следы сплошной вечной мерзлоты. Мощность вечной мерзлоты у края ледника могла достигать 100 м и уменьшалась от него в противоположных направлениях. К югу от границы ледника вечная мерзлота простиралась на 700 км [20]. Мерзлые условия обеспечивали в целом прочность сцепления ледника с ложем, отсутствие скольжения или слабое базальное скольжение между льдом и ложем, минимальную эрозию ложа. Как следствие, потенциал для изменения ложа был малым и ограниченное количество ледниковых ложбин формировалось в периферической зоне базально-мерзлого льда.

В пределах переходной зоны на повышаниях и в районах распространения отложений с более низкой термальной проводимостью ложе ледника все еще оставалось мерзлым, тогда как промежуточные районы достигали точки таяния. В целом эта зона, как предполагается, находилась в состоянии температурного равновесия и преимущественно ни мерзлого, ни талого ложа. В районах зоны, где теплый лед замещался вдоль линии течения базально-холодной зоной, имела место ледниковая эрозия, в частности выпахивание. По мнению М. Р. Беннета и Н. Ф. Глассера [14], это происходит вследствие того, что талые ледниковые воды, поступающие из зоны базально-теплого льда, замерзают под холодным льдом и примерзают к подошве ледника, способствуя выпахиванию, удалению обломков и глыб пород с ложа и аккреции на подошве ледника мощного мореносодержащего льда. Выпахивание концентрировалось на выклинивающихся участках мерзлого субстрата, лежащих на талых породах, потому что детачмент мог быть облегчен высоким давлением поровой воды в размороженных породах внизу мерзлой зоны. Выемки, из которых блоки были сорваны, стали ложбинами, а отторгнутые блоки пород сформировали холмы.

Переходная зона характеризуется появлением отдельных участков и пятен талых пород узкой и вытянутой формы. Такие острова талого субстрата приурочены к погребенным ложбинам, активным разломам и осевым зонам ледниковых языков, в пределах которых многими исследователями отмечается базальное таяние за счет комбинации большей мощности льда, конвергентного схождения и ускорения ледникового течения, нагрева от трения и геотермального тепла [3; 21]. Ледниковый лед выпахивает преимущественно вдоль пятен талого субстрата, вытянутых субпараллельно направлению ледникового течения. На таких легко выпахиваемых участках возникли самые крупные радиально вытянутые ложбины экзарации и выдавливания языковых комплексов Нарочанского, Дисненского, Полоцкого и Суражского лопатных краевых секторов.

Далее к северу от зоны прерывистой мерзлоты, где располагается талая зона субстрата, происходит базальное скольжение. Это вызывает развитие сжимающего течения на внутренней окраине зоны прерывистой мерзлоты, в пределах которой ледник почти не испытывает скольжение по ложу. Данные обстоятельства приводят к появлению крупных надвигов вблизи ледникового края, по которым базальный лед и чешуи подледниковых отложений выдавливаются в направлении поверхности ледника. Зона талого ложа и ее внешняя окраина, где ледниковые лопасти осуществляли выпахивание и формирование напорной надвиговой морены у своего края, стала местом образования лопатных экзарационных впадин – Дисненской, Полоцкой и Суражской гляциодепрессий.

Термические условия определяют способность субстрата пропускать талые ледниковые воды из ледникового ложа и играют существенную роль в контроле формирования субгляциальных водно-эрозионных ложбин. Поскольку напорные талые ледниковые и подземные воды не могли разгружаться по водоносным горизонтам через мерзлый ледниковый край и клин вечной мерзлоты, они попадали в ловушку и накапливались в зоне талого ложа в многочисленных небольших подледных озерах, занимавших самые глубокие экзарационные впадины на дне гляциодепрессий. В прерывистом мерзлом ложе на пониженных талых участках часто возникали отдельные мелкие каналы, которые образовывались по мере того, как талая вода прорывалась к внешнему краю зоны. Предпосылки оформления крупных субгляциальных водно-эрозионных ложбин реализовались на этапе деградации ледникового щита (в витескую фазу), когда давление подледных вод превысило прочность перекрывающего льда, произошли его разрывы и стали возможными катастрофические выбросы талых вод подледных подпрудных озер по отдельным каналам высокого давления в местах крупных надвигов у края ледника.

Выводы

Распределение ледниковых ложбин в северной части Беларуси можно объяснить с позиций изменения базальных термических условий под краевой зоной Поозерского ледникового покрова в максимальную стадию и в начале деградации. По геологическим и геоморфологическим критериям здесь были установлены следующие концентрические зоны (от края вглубь ледникового щита): 1) внешняя зона базально-мерзлого льда, в которой ледниковые ложбины встречаются весьма редко, за исключением разломов; 2) зона прерывистого мерзлого ложа, где сосредоточена преобладающая часть ложбин ледниковой экзарации и выдавливания, а также субгляциальных водно-эрозионных ложбин; 3) внутренняя зона талого ложа, в которой доминируют лопатные и языковые экзарационно-эрозионные гляциодепрессии и сформировались субгляциальные озера.

Соотношение распределения ложбин с ледниковой термической зональностью неслучайно и связано с термозональным контролем субгляциальных ледниково-эрозионных, гляциотектонических, водно-эрозионных и других процессов в ложе ледника. Связь этих процессов с неодинаковыми термальными условиями осуществлялась через прочность сцепления лед – ложе и состояние фазовой границы между талой водой и льдом, которые определяли возможность базального скольжения, компрессионного течения льда, скопления и дренажа талых ледниковых вод.

Проникавший на территорию северной части Беларуси Поозерский ледниковый покров имел политермальный характер. Породы, размещавшиеся под краевой зоной ледника, были скованы вечной мерзлотой и прочно смерзлись с ледником, имели место лишь слабое послойно-пластическое течение и локальная эрозия. Однако во внутренней зоне, где ледник находился у точки плавления под давлением, талые ледниковые и подземные воды накапливались, способствуя базальному скольжению и ледниковой эрозии путем выпахивания и выдавливания. Это привело к образованию лопастных гляциодепрессий, формированию напорной надвиговой морены у их внешнего края и подледных озер в центральных районах.

Особенно благоприятные термические условия для формирования ледниковых ложбин сложились в переходной зоне прерывистого мерзлого ложа. Здесь теплый лед замещался вдоль линии течения базально-холодной зоной. Талые ледниковые воды, поступающие из зоны базально-теплого льда, замерзали под холодным льдом и примерзали к подошве ледника, способствуя выпахиванию, удалению обломков и глыб пород с ложа и аккреции на подошве ледника мощного мореносодержащего льда. Кроме того, появлению ложбин способствовали сжимающее течение и движение льда по внутренним сколам. В результате в зоне прерывистого мерзлого ложа возникли самые крупные радиально вытянутые ложбины экзарации и выдавливания языковых комплексов.

Оформление крупных субгляциальных водно-эрозионных ложбин стало возможным на этапе деградации ледникового щита (в витебскую фазу), после того как талые ледниковые воды подледных подпружных озер нашли выход в краевую зону через прерывистое мерзлое ложе и были спущены в результате катастрофических выбросов по отдельным каналам, которые углубились, расширились и образовали ложбины.

Библиографические ссылки

1. Boulton GS. Glaciers and their coupling with hydraulic and sedimentary processes. In: Knight PG, editor. *Glacier science and environmental change*. [S. l.]: Blackwell Publishing; 2006. p. 2–22. DOI: 10.1002/9780470750636.ch2.
2. Kleman J, Glasser NF. The subglacial thermal organisation (STO) of ice sheets. *Quaternary Science Reviews*. 2007;26(5–6): 585–597. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.12.010.
3. Sugden DE. Glacial erosion by the Laurentide ice sheet. *Journal of Glaciology*. 1978;20(83):367–391.
4. Каплянская ФА, Тарноградский ВД. *Гляциальная геология. Методическое пособие по изучению ледниковых образований при геологической съемке крупного масштаба*. Санкт-Петербург: Недра; 1993. 328 с.
5. Kehew AE, Piotrowski JA, Jørgensen F. Tunnel valleys: concepts and controversies – a review. *Earth-Science Reviews*. 2012; 113(1–2):33–58. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.002.
6. Kleman J, Stroeven AP. Preglacial surface remnants and Quaternary glacial regimes in northwestern Sweden. *Geomorphology*. 1997;19(1–2):35–54. DOI: 10.1016/S0169-555X(96)00046-3.
7. Kleman J, Hättestrand C, Stroeven AP, Jansson KN, De Angelis H, Borgström I. Reconstruction of palaeo-ice sheets – inversion of their glacial geomorphological record. In: Knight PG, editor. *Glacier science and environmental change*. [S. l.]: Blackwell Publishing; 2006. p. 192–199. DOI: 10.1002/9780470750636.ch38.
8. Evans DJA. Controlled moraines: origins, characteristics and palaeoglaciological implications. *Quaternary Science Reviews*. 2009;28(3–4):183–208. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.10.024.
9. Etzelmüller B, Hagen JO. Glacier-permafrost interaction in Arctic and alpine mountain environments with examples from southern Norway and Svalbard. In: Harris C, Murton JB, editors. *Cryospheric systems: glaciers and permafrost*. London: Geological Society; 2005. p. 11–27 (Geological Society special publications, No. 242).
10. Комаровский МЕ, Васильев СЮ, Каштелян ОЛ. Формирование туннелей и рытвин разжижением отложений в пределах Скидельской низины. *Литасфера*. 2011;1:114–121.
11. Комаровский МЕ, Хилькевич ЕВ. Происхождение и развитие перигляциальной долины Пышки в пределах Гродненской возвышенности. *Литасфера*. 2016;2:69–84.
12. Уошборн АЛ. *Мир холода. Геокриологические исследования*. Втюрин БИ, редактор. Москва: Прогресс; 1988. 384 с.
13. Комаровский МЕ, Хилькевич ЕВ. Соотношение между ледниковыми ложбинами и активными разломами на территории Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2018;2:106–117.
14. Bennett MR, Glasser NF. *Glacial geology: ice sheets and landforms*. 2nd edition. [S. l.]: Wiley-Blackwell; 2009. XIII, 385 p.
15. Комаровский МЕ. *Палеоложбины Белорусского Поозерья*. Минск: БГУ; 2009. 181 с.
16. Cutler PM, Colgan PM, Mickelson DM. Sedimentologic evidence for outburst floods from the Laurentide Ice Sheet margin in Wisconsin, USA: implications for tunnel-channel formation. *Quaternary International*. 2002;90(1):23–40. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00090-8.
17. Jørgensen F, Sandersen PBE. Buried and open tunnel valleys in Denmark – erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews*. 2006;25(11–12):1339–1363. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.11.006.
18. Benn DI, Evans DJA. *Glaciers and glaciation*. 2nd edition. London: Hader Education; 2010. 802 p.
19. Исаченков ВА. *Проблемы морфоструктуры и древнеледниковой морфоскульптуры*. Ленинград: Наука; 1988. 176 с.
20. Герасимов ИП, Величико АА, редакторы. *Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет (атлас-монография) = Paleogeography of Europe during the last one hundred thousand years (atlas-monograph)*. Москва: Наука; 1982. 155 с.
21. Hall AM, Glasser NF. Reconstructing the basal thermal regime of an ice stream in a landscape of selective linear erosion: Glen Avon, Cairngorm Mountains, Scotland. *Boreas*. 2003;32(1):191–207. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2003.tb01437.x.

References

1. Boulton GS. Glaciers and their coupling with hydraulic and sedimentary processes. In: Knight PG, editor. *Glacier science and environmental change*. [S. l.]: Blackwell Publishing; 2006. p. 2–22. DOI: 10.1002/9780470750636.ch2.
2. Kleman J, Glasser NF. The subglacial thermal organisation (STO) of ice sheets. *Quaternary Science Reviews*. 2007;26(5–6): 585–597. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.12.010.
3. Sugden DE. Glacial erosion by the Laurentide ice sheet. *Journal of Glaciology*. 1978;20(83):367–391.
4. Kaplyanskaya FA, Tarnogradskii VD. *Glyatsial'naya geologiya. Metodicheskoe posobie po izucheniyu lednikovykh obrazovaniy pri geologicheskoi s'emke krupnogo masshtaba* [Glacial geology. A toolkit for the study of glacial formations in large-scale geological surveys]. Saint Petersburg: Nedra; 1993. 328 p. Russian.
5. Kehew AE, Piotrowski JA, Jørgensen F. Tunnel valleys: concepts and controversies – a review. *Earth-Science Reviews*. 2012; 113(1–2):33–58. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.002.
6. Kleman J, Stroeven AP. Preglacial surface remnants and Quaternary glacial regimes in northwestern Sweden. *Geomorphology*. 1997;19(1–2):35–54. DOI: 10.1016/S0169-555X(96)00046-3.
7. Kleman J, Hättestrand C, Stroeven AP, Jansson KN, De Angelis H, Borgström I. Reconstruction of palaeo-ice sheets – inversion of their glacial geomorphological record. In: Knight PG, editor. *Glacier science and environmental change*. [S. l.]: Blackwell Publishing; 2006. p. 192–199. DOI: 10.1002/9780470750636.ch38.
8. Evans DJA. Controlled moraines: origins, characteristics and palaeoglaciological implications. *Quaternary Science Reviews*. 2009;28(3–4):183–208. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.10.024.
9. Etzelmüller B, Hagen JO. Glacier-permafrost interaction in Arctic and alpine mountain environments with examples from southern Norway and Svalbard. In: Harris C, Murton JB, editors. *Cryospheric systems: glaciers and permafrost*. London: Geological Society; 2005. p. 11–27 (Geological Society special publications; No. 242).
10. Komarovskiy ME, Vasiliev SYu, Kashtelyan OL. Formation of tunnels and grooves by dilution of deposits within the Skidel Lowland. *Litasfera*. 2011;1:114–121. Russian.
11. Komarovskiy ME, Khilkevich EV. Origin and formation of the Pishki periglacial valley within the Grodno Highland. *Litasfera*. 2016;2:69–84. Russian.
12. Washburn AL. *Mir kholoda. Geokriologicheskie issledovaniya* [Cold world. Geocryological research]. Vtyurin BI, editor. Moscow: Progress; 1988. 384 p. Russian.
13. Komarovskiy ME, Khilkevich EV. Correlation between glacial valleys and active faults in Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2018;2:106–117. Russian.
14. Bennett MR, Glasser NF. *Glacial geology: ice sheets and landforms*. 2nd edition. [S. l.]: Wiley-Blackwell; 2009. XIII, 385 p.
15. Komarovskiy ME. *Paleolozhbiny Belorussskogo Poozer'ya* [Paleo-valleys in the Belarusian Poozerie area]. Minsk: Belarusian State University; 2009. 181 p. Russian.
16. Cutler PM, Colgan PM, Mickelson DM. Sedimentologic evidence for outburst floods from the Laurentide Ice Sheet margin in Wisconsin, USA: implications for tunnel-channel formation. *Quaternary International*. 2002;90(1):23–40. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00090-8.
17. Jørgensen F, Sandersen PBE. Buried and open tunnel valleys in Denmark – erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews*. 2006;25(11–12):1339–1363. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.11.006.
18. Benn DI, Evans DJA. *Glaciers and glaciation*. 2nd edition. London: Hader Education; 2010. 802 p.
19. Isachenkov VA. *Problemy morfostruktury i drevnelednikovoi morfoskul'ptury* [Problems of morphostructure and ancient morphosculpture]. Leningrad: Nauka; 1988. 176 p. Russian.
20. Gerasimov IP, Velichko AA, editors. *Paleogeography of Europe during the last one hundred thousand years (atlas-monograph)*. Moscow: Nauka; 1982. 155 p. Russian.
21. Hall AM, Glasser NF. Reconstructing the basal thermal regime of an ice stream in a landscape of selective linear erosion: Glen Avon, Cairngorm Mountains, Scotland. *Boreas*. 2003;32(1):191–207. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2003.tb01437.x.

Получена 31.08.2021 / исправлена 24.03.2022 / принята 24.03.2022.
Received 31.08.2021 / revised 24.03.2022 / accepted 24.03.2022.