

На правах рукописи

**Сизов Олег Сергеевич**

**СЕВЕРНЫЕ МАТЕРИКОВЫЕ ДЮНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ:  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ,  
ЭКОСИСТЕМНОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

1.6.21. Геоэкология

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

доктора географических наук

Тюмень – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский государственный университет».

**Официальные оппоненты:**

Защита диссертации состоится

С диссертацией можно ознакомиться в

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте

Автореферат разослан «\_\_\_» 202 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Арктические экосистемы характеризуются слабой устойчивостью к антропогенному воздействию и долгосрочным изменениям климата. Наименее устойчивыми на севере Западной Сибири являются сосново-лишайниковые редколесья в подзоне северной тайги и лишайниковые пустоши на автоморфных участках в зоне тундры. Результатом интенсивного физического воздействия на таких участках является, как правило, нарушение температурного режима грунтов, деградация почвенно-растительного покрова и активизация дефляции. Официальная экологическая статистика за последние годы фиксирует неуклонное расширение площади нарушенных земель в результате разработки месторождений нефти и газа [Доклад..., 2023]. Процессы снижения биопродуктивности и опустынивания в зоне тундры и лесотундры также тесно связаны с интенсификацией традиционных форм хозяйства, в частности с перевыпасом домашних оленей. Общий рост техногенной нарушенности, развитие обезлесивания и опустынивания рассматриваются в настоящее время исследователями как одни из наиболее актуальных геоэкологических проблем региона [Пуровский район..., 1996; Соромотин, Сизов, 2007]. В этом отношении вполне очевидна необходимость комплексного изучения причин, проявлений и динамики антропогенной нарушенности почвенно-растительного покрова в передачах тундровых, лесотундровых и северо-таежных ландшафтов с последующей разработкой методов экологической реставрации нарушенных территорий.

Вместе с тем, в настоящее время имеется слабое понимание ответной реакции экосистем на глобальные долгосрочные климатические изменения, наиболее явно проявляющиеся в арктических и субарктических регионах [Доклад..., 2023]. В данном контексте анализ особенностей эолового осадконакопления служит основой для различных ландшафтных реконструкций, поскольку рельеф и литология являются наиболее консервативными элементами ландшафта (*«твердым компонентом»* по [Исаченко, 1962, с. 32]). Другими словами, изучение возможных сочетаний климатических условий и ландшафтных обстановок на примере процессов формирования и динамики эолового рельефа позволяет обоснованно представить будущие возможные изменения территории в зависимости от роста или уменьшения ветрового воздействия, тепло- или влагообеспеченности. Этому способствует достаточно детальное представление о физических закономерностях эоловой деятельности [Bagnold, 1941; Chupil, 1945a, 1945b; McKee, 1979; Pye, Tsoar, 2009], которые равнозначно проявляются вне зависимости от конкретного географического положения. Таким образом, для разработки климатических прогнозов и геоэкологического моделирования важную роль играет детальное изучение современных климатических, геоботанических и почвенных условий развития

отдельных форм эолового рельефа, применительно к районам его наиболее масштабного распространения.

На основе принципа актуализма [Лайель, 1866] можно допустить, что естественными ограничителями для всевозможных прогнозов и моделей являются крайние (экстремально теплые или холодные) условия, которые формировались в северной и центральной частях Западной Сибири в течение четвертичного периода. В этом плане изучаемая территория, согласно имеющимся взглядам, в различное время могла представлять собой: холодную обширную позднеледниковую пустыню [Волков, 1971; Величко, Тимирёва, 2005], арену развития крупных покровных оледенений [Архипов, 1971; Земцов, 1976], дно ледниково-подпрудного («озеро Манси») [Волков, Волкова, 1964; Mangerud et al., 2004] или морского [Чочиа, Евдокимов, 1993; Кузин, 2005, 2013] водоема. Помимо этого, продолжается дискуссия относительно ледникового прошлого равнины как такового – в актуальной научной литературе нередко обосновываются диаметрально противоположные точки зрения [Astakhov, 2013; Astakhov et al., 2016; Sheinkman et al., 2024]. Отсутствие общего консенсуса приводит к расхождениям на официальных геологических картах [Лист R-45..., 2016; Лист R-44..., 2019] и определенным сложностям при проведении междисциплинарных исследований. Подобная ситуация обуславливает необходимость подробного рассмотрения палеогеографических аспектов формирования эоловых осадков, а также выявления их индикационного значения при реконструкции условий осадконакопления на рассматриваемой территории в целом. Перспективность данного направления исследований во многом связана с высокой степенью устойчивости эоловых песков к постседиментационной трансформации и процессам выветривания [Bagnold, 1941; Chepil, 1945b, 1945a; McKee, 1979; Pye, Tsoar, 2009]. Формы эоловой аккумуляции также хорошо сохраняются длительное время даже в условиях повышенной влажности, криогенного воздействия или активного зарастания. Следовательно, палеогеографическое изучение эоловых и парагенетически связанных с ними четвертичных образований, приуроченных к определенным формам рельефа, имеет высокий научный потенциал для решения проблемных вопросов, связанных с историей и прогнозом развития ландшафтов Западной Сибири.

Еще одним значимым аспектом, определяющим актуальность данной работы, является повышение общего уровня современных научных исследований, которое выражается, в частности, в лавинообразном росте первичных научных данных. Это относится как к результатам разнообразных полевых исследований, которые свободно распространяются в рамках международных проектов (CALM, TSP и др.) [Brown et al., 2000; Romanovsky et al., 2010; Vasiliev et al., 2020], так и к данным дистанционных наблюдений, охватывающих в т.ч. и арктические регионы (космические снимки Landsat, Sentinel, Corona, «Ресурс-П» и др.; цифровые модели рельефа ArcticDEM, AW3D30, AsterDEM2, TanDEM90 и др.). В этих условиях важную роль

приобретает разработка методических подходов по совместному использованию разнородных данных для обеспечения целостного и непротиворечивого представления наблюдаемых природных процессов и явлений. Эоловый рельеф в данном случае является достаточно репрезентативным объектом исследований, который четко локализован и доступен для изучения различными наземными методами, в то же время он имеет устойчивые индикационные признаки, позволяющие задействовать весь доступный арсенал дистанционных средств для оценки современного состояния, уточнения пространственного распространения и выявления динамики различных природных процессов. Возможность получения всеобъемлющего представления о материковых формах эолового рельефа на севере Западной Сибири с недостижимой ранее степенью детальности, полноты и пространственного охвата составляет несомненный фундаментальный научный интерес.

Современный уровень научных исследований подразумевает также возможность применения новых методов определения календарного возраста песчаных осадков различного генезиса (ОСЛ, УМС). Глубина временного охвата позволяет провести актуализацию и корреляцию представлений предшественников о средне- и позднечетвертичном развитии рельефа в целом [Рельеф..., 1988] и эоловых форм в частности [Земцов, 1962].

Кроме того, текущий геоэкологический контекст предполагает учет социальных аспектов проявления изучаемых процессов и явлений. На примере эолового рельефа, который обладает яркими интразональными признаками, хорошо прослеживается высокий интерес со стороны местного населения и значительная степень вовлечения в различные формы хозяйственной деятельности. Причины подобного интереса и активного хозяйственного использования безусловно заслуживают отдельного подробного рассмотрения.

#### **Степень изученности темы исследования**

Эоловые процессы и формы рельефа в России имеют длительную историю изучения [Соколов, 1884; Обручев, 1890; Тутковский, 1899, 1910]. Однако основное внимание в большинстве исследований уделялось территориям с аридными условиями, где деятельность ветра имеет наибольшее распространение [Федорович, 1983; Чичагов, 2010]. В северных регионах, несмотря на многочисленные упоминания в геологических отчетах, отдельных публикациях и обобщающих монографиях, специальные предметные исследования эоловых отложений и форм рельефа практически не проводилось. За последние 15 лет можно отметить буквально единичные работы, посвященные субэральным осадкам на северо-востоке Русской равнины [Астахов, Свенсен, 2011; Zaretskaya et al., 2024] и эоловому рельефу Якутии (на примере Кызыл-Сырского тукулана в бассейне р.Виллой) [Куть, 2015; Галанин и др., 2018; Галанин, Павлова, 2019]. Примеры планомерных комплексных исследований эолового рельефа на севере Западной Сибири в настоящее время отсутствуют.

Если рассматривать отдельные научные аспекты, то в первую очередь стоит отметить отсутствие общей карты распространения эолового рельефа в пределах Западно-Сибирской равнины. В литературе в основном встречаются отдельные полевые описание эоловых форм с привязкой к наиболее значимым географическим объектам (долинам рек, берегам крупных озер) [Земцов, 1962], также приводятся удельные площади развеваемых участков без детального описания районов их максимальной концентрации [Воскресенский, 2001]. Это же относится и к антропогенно-нарушенным территориям, которые в дальнейшем становятся ареной активизации процессов ветровой эрозии [Васильев, 1998; Солодовников, 2007]. Ситуацию не улучшает даже привлечение оцифрованных материалов топографических карт или глобальных наборов данных с результатами автоматической классификации [Global..., 2010]. Выделенные ранее маски оголенных песков либо потеряли свою актуальность, либо содержат высокую степень генерализации, не позволяющую объективно оценить особенности пространственного распространения.

Наряду с распространением эолового рельефа, определенный пробел существует и в представлении о морфологии континентальных эоловых форм севера Западной Сибири. Большинство имеющихся разрозненных описаний эолового микрорельефа, которые содержатся в отчетах о геологической и геоморфологической съемке территории, основаны на простейших инструментальных и визуальных методах [Хлебников, Ильина, 1954]. Кроме того, единичные наблюдения не позволяют сделать выводы о современной эоловой морфодинамике, которая имеет критическое значение при геоэкологическом прогнозировании и разработке рекультивационных мероприятий.

Несколько лучше изучена литология эоловых осадков [Земцов, 1976; Астахов, 1999; Назаров, 2011], кроме того за последние годы получен ряд датировок, который позволил выделить специфический горизонт «байдарацкого эолия», включающего два разновременных горизонта *оленьих* и *байдарацких* песков, который имеет повсеместное распространение при покровном залегании [Forman et al., 2002; Лист R-42..., 2015]. Однако, подобные исследования затрагивают лишь наиболее северные территории Ямала и Гыдана, в то время как на протяженном континентальном междуречье Оби и Енисея детальные аналитические работы практически не проводились, отсутствуют также данные и о возрасте эоловых осадков, которые широко распространены в долинах большинства крупных рек (Полуй, Казым, Надым, Пур, Таз) и их притоков. Аналогичная ситуация наблюдается с современным датированием и других парагенетических осадков.

Относительно специфики природных условий развития эоловых процессов можно отметить, что в научных работах рассматривается преимущественно проблема ветровой эрозии сельскохозяйственных угодий в южной части равнины [Евсеева, 2009]. Для северных районов Западной Сибири можно выделить отдельные исследования динамики растительности

на песчаных обнажениях естественного и антропогенного происхождения [Москаленко, 1999; Корнатов, Н. Г. Миляева, 2011; Лоботросова, 2014; Капитонова и др., 2017; Лоботросова и др., 2018]. Большинство вопросов, связанных с оценкой климатического потенциала дефляции, описанием флористического состава естественных песчаных раздувов, выявлением особенностей и ведущих факторов успешного первичного восстановления почвенного-растительного покрова на подвижных песках в научной литературе освещены слабо и требуют более детального рассмотрения. Получение подобных данных необходимо для локализации применяемых универсальных методик восстановления растительности, которые не учитывают региональные природные особенности.

Существенно лучше изучены материковые дюны в высокоширотных районах Европы, Северной и Южной Америки. В силу своей уникальности и интразональности, они являются популярным объектом исследований разнообразной тематики [McKee, 1979; Pye, Tsoar, 2009; Goudie, 2013; Lancaster et al., 2013; Livingstone, Warren, 2019; Lancaster, 2023], в частности:

- значительное количество работ посвящено геологическим и палеогеографическим вопросам происхождения эоловых отложений в контексте климатических изменений и формирования рельефа в конце неоплейстоцена и начале голоцена;

- на примере песчаных дюн проводятся многочисленные исследования первичных сукцессионных изменений растительности, расширяющих научное понимание закономерностей смены и восстановления растительных сообществ в неустойчивых и экстремальных условиях арктического климата;

- появление огромного объема различных дистанционных данных (аэрофотоснимки, космические снимки, лидарная съемка) стимулирует разнообразные исследования динамики природных процессов в пределах массивов подвижных песков (скорость перемещения дюн, интенсивность эоловой аккумуляции, активность зарастания дюн и др.).

В части теоретических обобщений определенный интерес вызывает относительно недавно предложенная концепция «гляцио-эоловых процессов», в рамках которой утверждается устойчивая связь периодов глобальных похолоданий с фазами активизации процессов эолового рельефообразования [Derbyshire, Owen, 2018]. При этом авторы концепции отмечают, что эоловый рельеф высоких широт требует более детального рассмотрения именно в контексте развития покровных плейстоценовых оледенений. В данном случае явно сформулированную гляцио-эоловую концепцию можно рассматривать как современное переосмысление более ранних представлений о включении эоловых отложений материковых дюн в общий ряд гляциоогенных образований [Brodzikowski, Loon, 1990].

Таким образом, наличие обширного объема знаний о ключевых аспектах развития эолового рельефа в высоких широтах различных регионов создает

предпосылки для успешной интеграции полученных в рамках данной работы результатов в общую научную картину.

**Цель настоящего исследования** состоит в выявлении пространственно-временных закономерностей развития процессов эолового рельефообразования в равнинных условиях севера Западной Сибири в контексте общей истории развития рельефа территории и современного хозяйственного освоения.

Реализация поставленной цели включала решение следующих **задач**:

- 1) Установление фактического распространения наиболее типичных форм эолового рельефа природного и антропогенного генезиса;
- 2) Определение морфологических и морфодинамических параметров наиболее крупных и активных в настоящее время форм эолового рельефа;
- 3) Определение литологических и возрастных характеристик эоловых и генетически связанных с ними четвертичных образований с последующей реконструкцией истории развития эолового рельефа;
- 4) Оценка климатических, геоботанических и почвенных условий развития современных эоловых процессов;
- 5) Установление основных показателей, особенностей и механизмов формирования техногенной нарушенности в результате освоения нефтегазовых месторождений с дальнейшей разработкой предложений по повышению эффективности рекультивационных мероприятий;
- 6) Оценка влияния эолового рельефа на структуру природопользования и систему жизнеобеспечения местного населения.

**Объект исследования** – ландшафты северо-таежной подзоны Западной Сибири, подверженные в настоящем и прошлом процессам эолового рельефообразования. Эоловые и генетически сопряженные с ними четвертичные образования, а также слагаемыми ими формы рельефа имеют точную локализацию и характерные признаки, обеспечивающие их однозначную натурную идентификацию.

**Предмет исследования** – пространственно-временная динамика, особенности проявления и факторы развития процессов эолового рельефообразования в холодных континентальных условиях, а также их трансформация под влиянием масштабной хозяйственной деятельности по добыче и транспортировке углеводородов.

**Пространственные рамки** территории полевых исследований ограничены бассейнами рек Надым, Полуй, Казым, Пур, а также южным побережьем Обской губы (Надымская Обь) (рис. 1). Контрольные по отношению к основной территории исследований участки расположены на водоразделах Салехардского увала, Аганского увала, Белогорской возвышенности, в верхнем течении р.Таз, а также в нижнем течении р.Тура. Дистанционные исследования (актуализация геоморфологического районирования, анализ удельной площади озер, картографирование различных форм эолового рельефа) проводились в пределах всей территории Западно-Сибирской равнины.



исследований на примере репрезентативных ключевых участков с дальнейшим привлечением современных геохронологических и камеральных методов. Геоморфологический реанализ основан на формировании логически непротиворечивой картины из существующих картографических материалов и объективных дистанционных данных, полученных инструментальными способами (космических снимков и цифровых моделей рельефа).

Определенной методологической новацией является внедрение элементов междисциплинарных исследований с акцентом на социально-экологическую проблематику. Это повышает степень актуальности и практико-ориентированности работы, но, с другой стороны, приводит к увеличению ее трудоемкости и длительности. Тем не менее, предполагается, что именно комплексный подход, обеспечивающий системное и всеохватное рассмотрение различных аспектов эолового рельефообразования, составляет сущность современных геоэкологических исследований.

#### **Фактический материал и личный вклад соискателя**

В основу работы легли результаты полевых и дистанционных исследований, проведенных соискателем лично, в т.ч. в качестве руководителя научной группы, в период с 2004 по 2024 гг. Работы выполнены при финансовой поддержке:

- НИИ экологии и РИПР ТюмГУ – изучение причин пылевого загрязнения атмосферного воздуха в пределах г. Муравленко (ЯНАО) (рук. А.В. Соромотин);

- ИКЗ СО РАН – проект №144 «Криогенные ресурсы Арктики и Субарктики: состояние и структура криолитозоны, физико-химическое моделирование и биологический потенциал криогенных систем», подтема: «Органическое вещество почв криолитозоны и особенности его трансформации при деградации многолетнемерзлых пород» (рук. В.С. Зыкина, А.С. Якимов);

- РФФИ – проекты №№ 16-45-890529 «Дефляционные процессы в тундровой и северо-таежной зонах Западной Сибири: распространение, условия развития и способы рекультивации оголенных песков» (рук. А.В. Соромотин); 16-45-890312 р\_а «Комплексное изучение почвенного покрова о. Белый (Карское море)» (рук. А.А. Юртаев); 16-06-00260 «Древнее население на берегах системы проточных озер: динамика освоения и жизнеобеспечение (на примере Андреевской озерной системы в Туро-Пышминском междуречье)» (рук. В.А. Зах); 19-45-890008 р\_а «Северные дюны Западной Сибири: происхождение, история развития, современная динамика и устойчивость в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия» (рук. А.В. Соромотин); 19-45-890017 р\_а «Комплексное изучение почвенного покрова арктических тундр полуострова Гыданский и островов Карского моря (на примере острова Вилькицкого)» (рук. А.А. Юртаев); 20-55-71004 «Открытые городские пространства как фактор обеспечения устойчивого развития в Арктике в условиях климатических изменений» (рук. А.В. Соромотин);

– РФФ – проект №17-17-01289 «Перестройка систем стока и миграция главного водораздела Русской равнины в последнюю ледниковую эпоху» (рук. А.В. Панин);

– Правительства Тюменской области – проект №89-ДОН(1) «Устойчивое землепользование в Арктике в свете глобальных природных изменений: естественные и антропогенные факторы стабильности (TerrArctic)» (рук. Я.В. Кузяков).

Часть работ проведена за счет личных сбережений автора. Финансирование иностранных фондов при проведении исследований не привлекалось.

Исходные дистанционные данные (аэрофотоснимки, космические снимки, цифровые модели рельефа) получены либо непосредственно в процессе съемки с БПЛА, либо из открытых общедоступных источников. Незначительная часть съемки с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением получена в рамках реализации конкретных научных проектов, перечисленных выше.

Лабораторные исследования отобранных проб проводились в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск), лаборатории механики грунтов Института криосферы Земли ТНЦ СО РАН (Тюмень), ЦКП научным оборудованием ИФХиБПП РАН (Пушино), лаборатории АО «Региональный Аналитический Центр» (Тюмень) и ЦКП научным оборудованием ТГУ (Томск). Морфоскопический анализ кварцевых зерен выполнялся в лаборатории геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН. Подготовка шлифов выполнена в ООО «Западно-Сибирский Геологический Центр» (Тюмень), первичный анализ – в лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы ТюмГУ (Тюмень). Обработка и анализ кернов деревьев проводились на кафедре физической географии и ландшафтоведения МГУ (Москва). Радиоуглеродное датирование отложений проводилось в лаборатории геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН (Новосибирск), ЦКП научным оборудованием «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ» (Новосибирск); люминесцентное – в Северной люминесцентной лаборатории Университета Орхуса (Дания), а также в Лаборатории геохронологии четвертичного периода Института геологии Таллиннского технологического университета (Эстония).

Личный вклад автора состоит в разработке концепции исследования, постановке цели и задач, выборе объектов и определении методических подходов, критическом анализе и теоретическом обобщении полученных материалов. Автор принимал непосредственное участие в планировании, подготовке и проведении полевых маршрутов, в ходе которых им лично проводились геологические, геоморфологические и геоботанические исследования, отбор проб, съемка с БПЛА. Весь комплекс работ по обработке и дешифрированию дистанционных данных, статистической обработке и

интерпретации результатов лабораторной аналитики, подготовке графических материалов и приложений выполнен лично автором.

### **Научная новизна полученных результатов**

Учитывая слабую изученность процессов эолового рельефообразования на севере Западной Сибири, результаты реализации каждой поставленной задачи исследования могут характеризоваться значительной степенью научной новизны. Среди наиболее существенных *фактических* данных, полученных впервые в настоящей работе, можно отметить следующие:

1) Составлена серия карт, детально отражающих пространственное распространение современных (активных) и древних (стабилизированных) форм эолового рельефа на всей территории Западно-Сибирской равнины.

2) Получены детальные количественные оценки значений литологических, морфологических и морфодинамических параметров для обширной выборки тестовых объектов эолового рельефа, локализованных во всех крупных речных бассейнах рассматриваемой территории.

3) Получен статистически значимый объем люминесцентных и радиоуглеродных датировок песчаных осадков эолового и водного генезиса, которые к настоящему времени наиболее репрезентативны для континентальных районов севера Западной Сибири.

4) Установлены предельные значения основных климатических показателей, определяющих развитие эоловых процессов в современных природных условиях севера Западной Сибири, а также степень устойчивости и механизм сукцессионных изменений растительных сообществ подвижных эоловых песков.

5) Определены детальные значения динамики нарушенности почвенно-растительного покрова, связанной с освоением нефтегазовых месторождений, прокладкой дорог и инженерных коммуникаций, а также созданием сухоройных песчаных карьеров.

6) Разработана система индикаторов основных форм и способов социально-экологического взаимодействия местного городского населения с ландшафтами эоловых массивов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Представление о материковых дюнах в контексте развития *гляциоэоловых* геоморфологических процессов позволяет рассматривать эоловые отложения на севере Западной Сибири в качестве закономерных парагенетических образований, составляющих неотъемлемую часть как ледниковой, так и перигляциальной формаций. Полученные в рамках данной работы результаты позволили выделить необходимые и достаточные условия активизации процессов эолового рельефообразования, которые в равной мере могут проявляться как в прогляциальной, так и в перигляциальной зоне седиментации. Это в значительной мере упрощает и унифицирует механизм гляциоэолового взаимодействия, научная дискуссия о котором продолжается на протяжении последнего столетия.

Вместе с тем, проведенный детальный критический разбор концепции внеледникового развития рельефа Западной Сибири в плейстоцене показал прежде всего ее теоретическую несостоятельность. Анализ используемой методологии и верификация фактической информации не оставляют возможностей для дальнейшего формализованного научного обсуждения антигляциализма применительно к территории севера Западной Сибири.

Полученные датировки четвертичных образований различного генезиса за достаточно длительный временной промежуток имеют самостоятельное стратиграфическое значение, позволяя с опорой на репрезентативные и равномерно распределенные по территории данные уточнить существующие представления о характере и продолжительности основных периодов осадконакопления во внутриконтинентальных областях севера Западной Сибири.

В научно-практическом отношении результаты исследования могут быть востребованы для устранения противоречий и уточнения существующих геологических и геоморфологических карт рассматриваемой территории, обеспечивая достоверную литологическую основу для научно-прикладных исследований в смежных научных дисциплинах (криолитологии, геоботанике, ландшафтоведении, геоэкологии и др.).

Практическая значимость работы состоит в определении фактической устойчивости экосистем эоловых массивов к различным видам антропогенного воздействия, точной локализации наиболее проблемных участков и оптимизации способов восстановления растительности на развееваемых песках применительно к природным условиям лесотундры и северной тайги Западной Сибири. Разработанные методы дистанционного мониторинга и конкретные решения по рекультивации нарушенных территорий могут найти применение в практической деятельности как контрольно-надзорных ведомств, так и непосредственно основных недропользователей.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) Эоловые отложения и формы рельефа распространены на всей территории Западной Сибири. В северной части равнины развитие материковых дюн генетически связано с неоднократным рельефообразующим воздействием покровных плейстоценовых оледенений.

2) Развеванию подвержены преимущественно водно-ледниковые зрелые пески в исходном или переотложенном состоянии, первичная аккумуляция которых происходила в периоды похолоданий на протяжении как минимум последних 700 тыс.л. Наиболее масштабная активизация эоловых процессов на севере Западной Сибири, отражающая глобальные климатические изменения в конце неоплейстоцена, геохронологически относится ко второй половине криохрона МИС-2 (22-12 тыс.л.н.).

3) На современном этапе основными климатическими параметрами, препятствующими масштабному развитию дефляции на севере Западной

Сибири, являются слабая активность ветра и избыток увлажнения в теплый период на фоне относительно низких среднегодовых температур воздуха.

4) Эоловые и водно-эоловые отложения, отличающиеся бедным минеральным составом и промывным водным режимом, являются устойчивым литологическим основанием для формирования наиболее подверженных дефляции низкобонитетных лишайниковых редколесий на маломощных подзолистых почвах – характерных ландшафтных ассоциаций, которые следует рассматривать как коренные и типичные для всей рассматриваемой территории.

5) Различные виды антропогенного механического воздействия в пределах наиболее уязвимых ландшафтов лишайниковых редколесий являются основной причиной активизации ветровой эрозии, однако в современных климатических условиях с прекращением активной хозяйственной деятельности нарушенные участки развеваемых песков имеют тенденцию к естественному зарастанию.

6) Эоловые массивы играют важную экосистемную роль в системе жизнеобеспечения местного населения, обеспечивая устойчивость на общем фоне деградирующей в условиях потепления многолетней мерзлоты и выступая концептуальной моделью адаптации к неблагоприятным природным условиям.

#### **Степень достоверности полученных результатов**

В основе исследования лежит достаточно обширный объем фактического материала, полученного с использованием современных научных средств и методов. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается реализацией следующих научных принципов:

- репрезентативность – дистанционные исследования охватывают рассматриваемую территорию целиком; ключевые участки полевых исследований имеют достаточно равномерное распределение по территории как в площадном, так и в высотном отношении;

- воспроизводимость – дешифрирование дистанционных данных основано на устойчивых индикационных признаках; большая часть отобранных проб сохранена и доступна для независимой проверки; участки полевых работ имеют точную географическую привязку и доступны для повторного посещения (подробное описание логистики может быть предоставлено по запросу);

- верифицируемость – результаты дистанционных исследований подтверждены полевыми проверками на контрольных участках; большинство лабораторных анализов однотипных отложений выполнено как минимум в двух независимых лабораториях;

- объективность – в исследовании используются исключительно апробированные и общераспространенные методики дистанционных и лабораторных исследований; результаты полевых работ получены с помощью инструментальных способов и средств;

– логичность – при аналитической обработке использовались все полученные кондиционные фактические материалы; исследование проводилось вплоть до формирования логически непротиворечивых эмпирических обобщений в отношении рассматриваемого процесса или явления;

– закономерность – для полученных результатов в тексте представлены аналоги из других независимых, но сходных по природным условиям, регионов, демонстрирующие прослеживаемость и детерминированность развития рассматриваемого процесса или явления;

– открытость – в работе представлено большинство полученной фактической информации, полный объем исходных первичных научных данных и метаданных может быть предоставлен по запросу.

### **Апробация результатов исследований**

Результаты исследований неоднократно докладывались на более 30 всероссийских и международных научных конференциях, среди которых: международная научно-практическая конференция «Антропогенная динамика природной среды» (Пермь, 2006), ИнтерКарто/ИнтерГИС 13 (Ханты-Мансийск, Йеллоунайф, 2007), The International Symposium «Euro-ECO» (Ганновер, Германия, 2007), Hannover» 2007, ИнтерКарто/ИнтерГИС 15 (Пермь, Гент, 2009), международная конференция «Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов» (Тюмень, 2010, 2011, 2013, 2014, 2016), XXXIII пленум Геоморфологической комиссии РАН (Саратов, 2013), European Geosciences Union General Assembly (Вена, Австрия, 2014), международная конференция «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы» (Тюмень, 2015), всероссийская научная конференция «Пути эволюционной географии» (Москва, 2016, 2021), X Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода (Москва, 2017), 9th International Conference on Geomorphology (New Delhi, India, 2017), XXXVI пленум Геоморфологической комиссии РАН (Барнаул, 2018), международная конференция «Актуальные вопросы биогеографии» (Санкт-Петербург, 2018), всероссийская научно-практическая конференция «Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке» (Томск, 2020), American Geophysical Union Fall Meeting (Онлайн, 2020), European Geosciences Union General Assembly (Онлайн, 2021), научная онлайн-сессия «Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов» (Новосибирск, 2021), American Geophysical Union Fall Meeting (Новый Орлеан, США, 2021), международная научная конференция «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике» (Салехард, 2021), научная конференция с международным участием «Геохронология четвертичного периода: инструментальные методы датирования новейших отложений» (Москва, 2022), Шестая конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» (Москва, 2022), ежегодная конференция по результатам экспедиционных исследований «Рельеф и четвертичные

образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России» (Санкт-Петербург, 2022, 2023), American Association of Geographers Annual Meeting (Онлайн, 2022), XXXVII пленум Геоморфологической комиссии РАН (Иркутск, 2023).

По теме диссертации опубликовано 2 монографии (из них 1 – в соавторстве) и 33 статьи в рецензируемых зарубежных и российских журналах, из которых: 18 – в международных изданиях, индексируемых SCOPUS/WoS; 15 – в российских рецензируемых журналах из перечня ВАК. Практические разработки в области рекультивации нарушенных территорий закреплены в 2 патентах.

**Соответствие научной специальности.** Диссертационная работа представляется по научной специальности 1.6.21 «Геоэкология». Согласно паспорту научной специальности 1.6.21 работа соответствует: пункту №7 «Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов, функционирования природно-технических систем»; пункту №9 «Динамика, механизмы, факторы и закономерности развития опасных природных, природно-техногенных и техногенных процессов, оценка их активности»; пункт №10 «Исторические (палеоэкологические и палеоклиматические) реконструкции и прогноз современных изменений природы и климата»; пункту №11 «Оценка экологического состояния и управление современными ландшафтами. Глобальные и региональные изменения ландшафтно-климатических условий среды обитания в антропоцене», пункту №14 «Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем»; пункту №16 «Современные методы геоэкологического картирования, ГИС-технологии и информационные системы в геоэкологии» и пункту №17 «Ресурсосбережение, санация и рекультивация земель».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, общим объемом 826 страниц, включая 315 рисунков, 66 таблиц и 27 приложений. Список литературы содержит 1536 источников, в т.ч. 662 зарубежных и 56 фондовых.

## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

**1. Эоловые отложения и формы рельефа распространены на всей территории Западной Сибири. В северной части равнины развитие материковых дюн генетически связано с неоднократным рельефообразующим воздействием покровных плейстоценовых оледенений.**

Разнообразие существующих форм эолового рельефа определяется режимом ветров, наличием орографических препятствий, гидрологическим режимом и активностью растительности [McKee, 1979; Федорович, 1983; Courrech du Pont et al., 2024]. Выполненное дешифрирование среднемасштабных космических снимков (Landsat; Sentinel-2) и цифровых моделей рельефа (ЦМР) (SRTM, ArcticDEM, AW3D30, WorldDEM) показало,

что на территории Западной Сибири к югу от Сибирских Увалов эоловый рельеф представлен эоловыми гривами (106 участков развития, общей площадью 134,5 тыс. кв.км), коридорами (ложбинами) выдувания (129 объектов, протяженность до 430 км), барханами (барханскими цепями) (33 участка развития, общей площадью 36,2 тыс. кв.км), эоловыми шлейфами (протяженность до 140 км) (рис. 2), а также отдельными котловинами выдувания (66 объектов, общей площадью 113 кв.км) и параболическими дюнами (468 объектов, общая протяженность 461 км) (котловины и дюны, локализованы в пределах Сургутского полесья). Эоловый генезис имеют также крупные аккумулятивные увалы (гряды) Приобского плато, зоны дефляции в междуречье Ишима и Тобола, а также относительно небольшие аккумулятивные гряды (лунообразные дюны) вдоль восточного побережья отдельных южных озер (Кучукское, Как, Аксуат и др.) [Rötter et al., 2023; Зыкина и др., 2023]. Морфологические особенности выявленных объектов свидетельствуют о том, что эоловое рельефообразование определяется длительным воздействием устойчивых однонаправленных ветров западного и юго-западного направления.

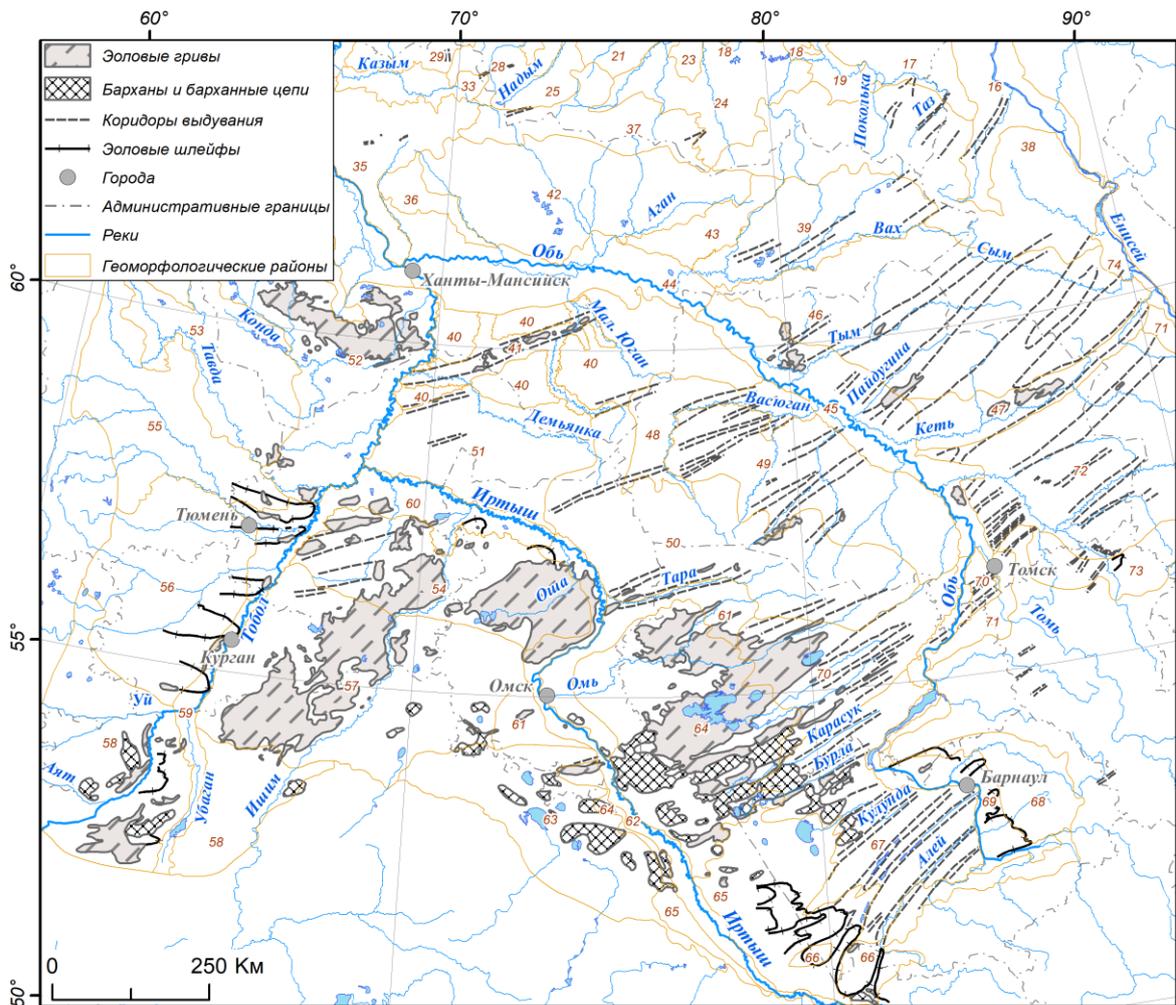


Рисунок 2 – Распространение эолового рельефа в пределах центральной и южной частей Западной Сибири

В северной части равнины эоловый рельеф представлен отдельными песчаными массивами, котловинами выдувания (раздувами), параболическими дюнами и локальными участками песчаных обнажений. Пространственное распределение отличается неравномерностью – зоны максимальной концентрации выделяются на Ямальском, Гыданском и Тазовском полуостровах, а также в бассейнах рр. Пур и Надым (рис. 3). На локальном уровне раздувы, как правило, приурочены к бортам речных долин, оврагов, балок и озерных котловин.

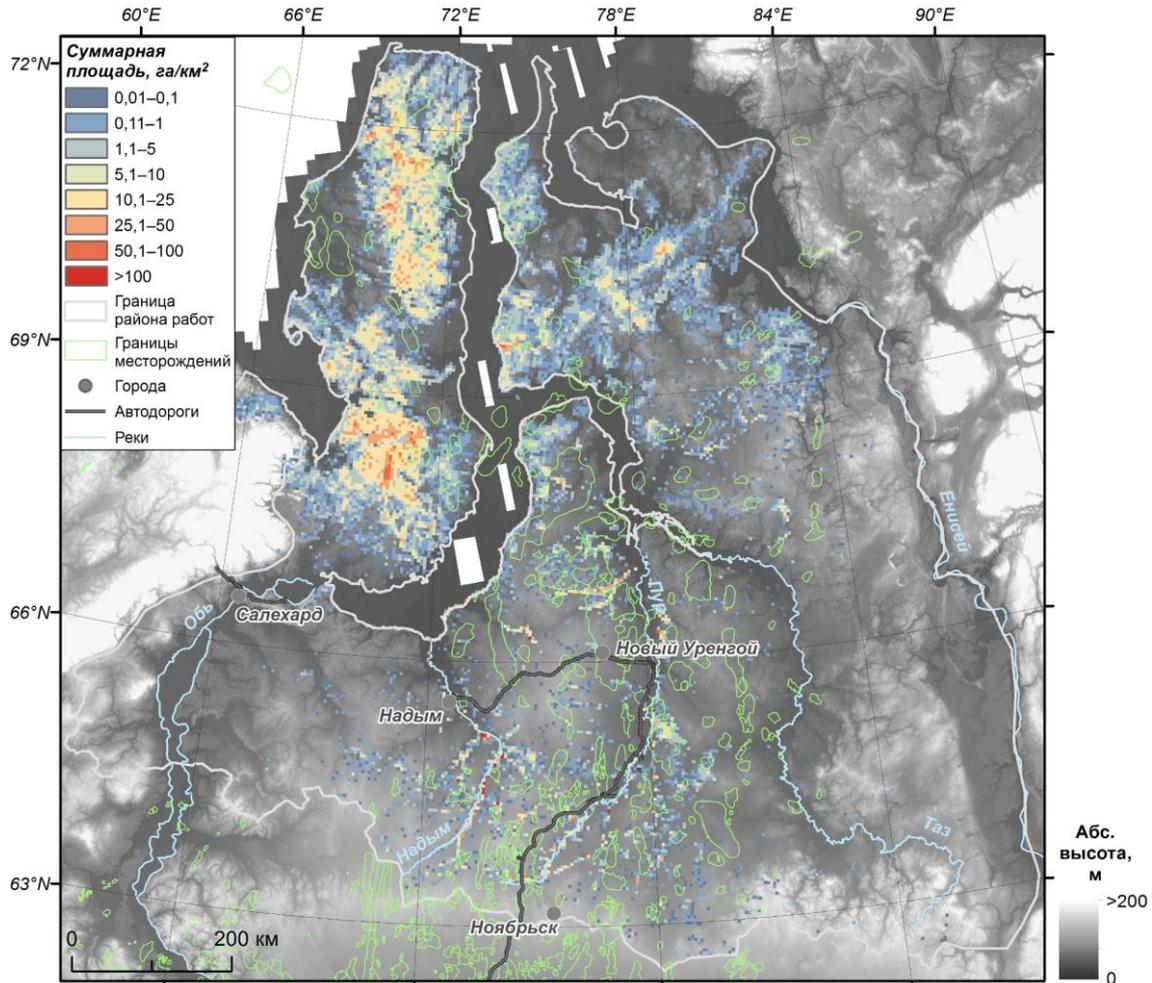


Рисунок 3 – Распространение естественных оголенных эоловых песков на севере Западной Сибири (суммарная площадь)

Естественные участки оголенных песков суммарно занимают порядка 1922,5 кв.км, средняя площадь участка составила 0,44 га, максимальная – 33,52 кв.км. Средняя площадь наиболее котловин крупных выдувания (55 объектов площадью более 1 кв.км.) – 4,5 кв.км (рис. 4), средняя максимальная высота периферических аккумулятивных валов – 5,61 м, средняя высота продольных дюн на поверхности котловин – 1,73 м.

Сопоставление материалов высокодетаальной космической съемки за 1960-2010-е гг. показало, что средняя скорость продвижения периферических

валов составляет в среднем 0,3 м/год, а продольных дюн на поверхности котловин выдувания – 0,5 м/год.



Рисунок 4 – Общий вид крупной (более 1 кв.км) котловины выдувания в среднем течении р. Надым (фото Сизова О.С., 2021)

Многолетние наземные наблюдения (2013-2022 гг.) в пределах модельной котловины выдувания (25 км к юго-востоку от г. Надым) показали, что эоловый перенос начинается в конце зимы во время снеготаяния и наблюдается в течение всего теплого периода. Эоловая аккумуляция наиболее активно проявляется на подветренной стороне подвижных периферических валов и продольных дюн на поверхности котловины – средние максимальные значения здесь достигают 15-25 см/год.

Выявленные в рамках данной работы эоловые отложения могут быть представлены в виде четырех основных фаций: подвижные (дюнные) пески; покровные пески; водно(озерно)-эоловые пески и лессовидные алевриты [Ruegg, 1981, 1983; Schwan, 1986, 1988; Koster, 1988; Brookfield, 2011; Derbyshire, Owen, 2018] (рис. 5). Отличительной особенностью эоловых песков является бимодальность гранулометрического состава – менее выраженное преобладание (43-56%) мелкозернистой фракции (125-250 мкм) при сравнительно высокой доле (28-37%) среднезернистой (250-500 мкм). Кроме того, для них характерна высокая седиментологическая зрелость (степень выветрелости), определяемая повышенной долей  $\text{SiO}_2$  (в среднем 93-95%). Морфоскопический анализ показал, что наряду с типично эоловыми признаками кварцевые зерна сохраняют следы обработки в водной, ледниковой (водно-ледниковой) и криогенной средах. Полученные результаты указывают на то, что наиболее вероятным способом первичной аккумуляции песчаных осадков, которые в дальнейшем подвергались перевеванию, является водный перенос в холодных условиях. Криогенные признаки свидетельствуют о последующей обработке эоловых зерен под воздействием экстремально низких температур.

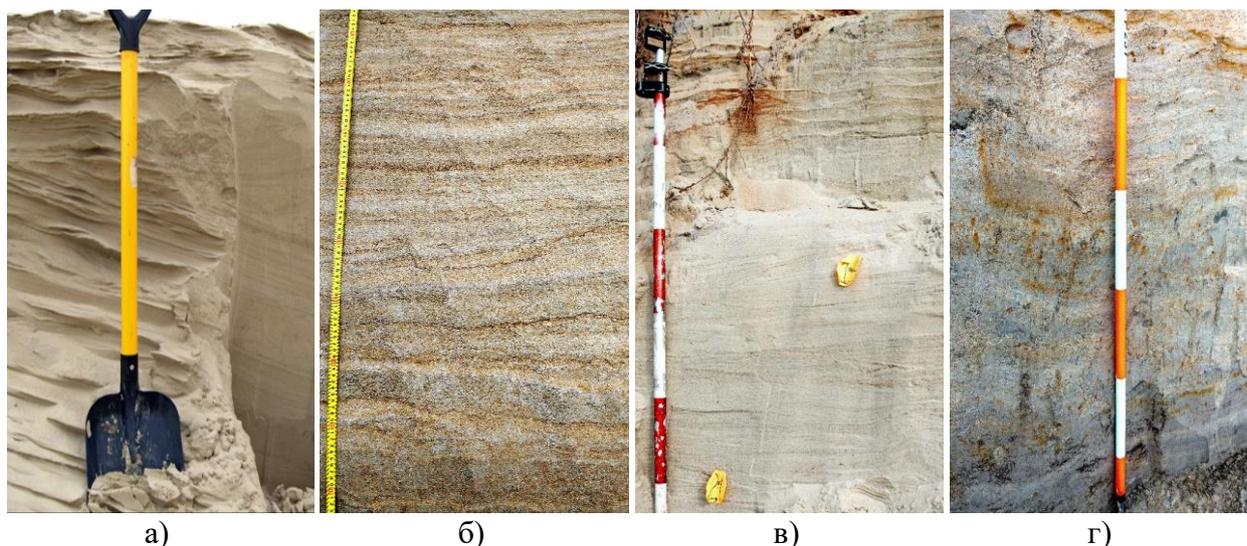


Рисунок 5 – Фации эоловых отложений: а) подвижные (дюнные) пески (разрез НР-1, р. Надым); б) покровные пески (обнажение 2022\_11, р. Нгарка-Пыряха); в) водно(озерно)-эоловые пески (разрез НР-34, р. Левая Хетта); г) лессовидные алевроиты (разрез НР-27, р. Шуга) (фото Сизова О.С., 2012, 2022, 2020, 2018 соответственно)

Широкое распространение эоловых процессов в высоких широтах традиционно связывается с холодными климатическими условиями перигляциальной зоны [Solger, 1905, 1910; Seppälä, 2004]. Однако, и в прогляциальной зоне эоловые осадки могут откладываться непосредственно у края или прямо на поверхности ледника [Суходровский, 1967; Волков, 1971; Brodzikowski, Loon van, 1987; Zdanowicz et al., 1998; Shahgedanova et al., 2013; Кутузов и др., 2014; Kutuzov et al., 2019]. Наиболее значимыми условиями в рассматриваемом контексте являются:

- формирование толщ водно-ледниковых отложений (зандровых песков [Земцов, 1976], перигляциального аллювия [Горецкий, 1958; Васильев, 1980; Холмовой, 2000] или песчаных осадков пресноводных озер и подпрудных водоемов [Павлов, Максимов, 1981; Ахаржанова, 2005]);
- переменный режим увлажнения в ходе дегляциации [Flint, 1971];
- постоянное воздействие кatabатических ветров [Speirs et al., 2008].

В этом отношении материковые дюны на севере Западной Сибири могут рассматриваться как результат развития *гляциоэоловых* [Derbyshire, Owen, 2018] геоморфологических процессов, составляя неотъемлемую часть ледниковой и перигляциальной формаций.

В рамках проверки данной гипотезы на примере среднего и нижнего течения р. Надым выявлены характерные формы ледникового и водно-ледникового рельефа: конечно-моренные гряды, камообразные холмы, моренно-камовые плато, озы, линейные гряды, долины (ложбины) стока талых ледниковых вод и цепочки озерных котловин (рис. 6). Генезис большинства типов аккумулятивных форм подтвержден в ходе полевых исследований, результаты которых приведены в основном тексте работы.

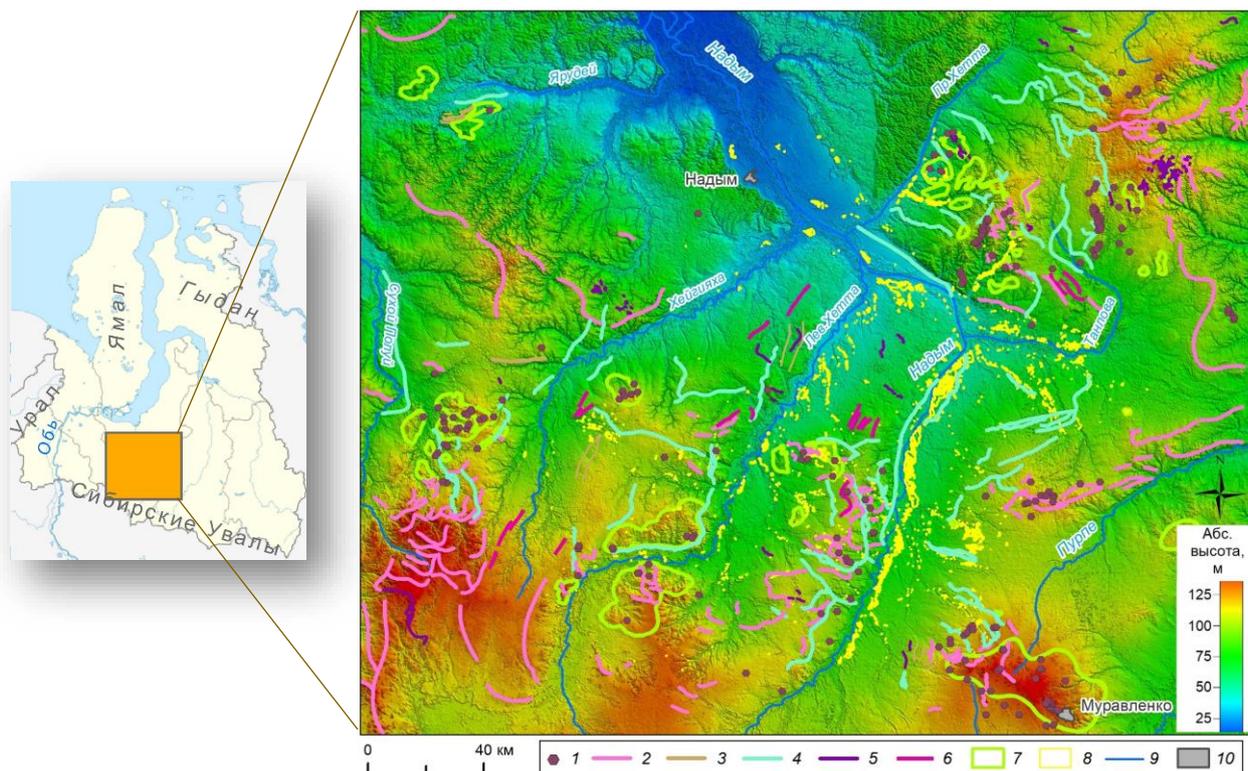


Рисунок 6 – Формы ледникового и водно-ледникового рельефа в бассейне р. Надым: 1 – камообразные холмы; 2 – конечно-моренные гряды; 3 – линейно-грядовый рельеф; 4 – ложбины стока; 5 – озы; 6 – цепочки озер; 7 – моренно-камовые плато; 8 – эоловые формы рельефа; 9 – водотоки; 10 – населенный пункт (подложка: TanDEM-X DEM©DLR)

**2. Развеванию подвержены преимущественно водно-ледниковые зрелые пески в исходном или переотложенном состоянии, первичная аккумуляция которых происходила в периоды похолоданий на протяжении как минимум последних 700 тыс.л. Наиболее масштабная активизация эоловых процессов на севере Западной Сибири, отражающая глобальные климатические изменения в конце неоплейстоцена, геохронологически относится ко второй половине криохрона МИС-2 (22-12 тыс.л.н.).**

Особенностью водно-ледниковых песчаных осадков на рассматриваемой территории является сочетание признаков водных и ледниковых обстановок. В отношении гранулометрического состава здесь также как и в эоловых отложениях проявляется бимодальность, но при обратном соотношении фракций: доля среднезернистых (250-500 мкм) песков составляет 40%, мелкозернистых (125-250 мкм) – 32%. Пески отличаются крайней степенью выветрелости – доля  $\text{SiO}_2$  может достигать 98,5%, при среднем значении 95%. Кварцевые зерна водно-ледниковых осадков по сравнению с эоловыми характеризуются наименьшими значениями окатанности (70%) и заматованности (35%), нередко они сохраняют ледниковые признаки – угловатую форму с острыми гранями, параллельные борозды, раковистый излом и др.

В рамках обсуждения высокой степени выветрелости водно-ледниковых песков можно отметить, что, как показывают актуальные исследования [Anderson, 2005], в полярных регионах в процессе дегляциации преобладает физическое выветривание с параллельным накоплением кварца при относительно бедном минеральном составе формируемых отложений. Также отмечается положительная зависимость скорости выветривания от площади оледенения, что выражается в повышении доли калия [Anderson, 2005].

Высокая доля кварца в эоловых песках, по всей видимости, является унаследованной, эту особенность предлагается рассматривать в качестве ведущего признака условий первичного осадконакопления и ключевого параметра для установления геохимической связи с источником отложений для эоловой переработки.

Устойчивыми литологическими и седиментологическими признаками собственно ледниковых отложений (валунных суглинков, морен, тиллов, диамиктона) являются: специфическая текстура (отсутствие слоистости); неоднородная мощность по простиранию; гляциодинамические проявления; гляциодислокации; специфический состав и микроморфология; наличие крупнообломочного материала со слабой окатанностью и следами штриховка; наличие песчаных отторженцев; наличие в разрезе парагенетических сочетаний при общем отсутствии остатков морской макрофауны (табл. 1). Фактически подтвержденное в рамках данной работы в разрезах и обнажениях наличие совокупности указанных признаков в бассейнах всех основных рек рассматриваемой территории (Надым, Полуй, Пур, Казым) позволяет дать однозначную интерпретацию генетической принадлежности выявленных обособленных толщ неслоистых валунных суглинков и широко распространенных толщ «зрелых» слоистых песков к ледниковым обстановкам осадконакопления.

На основе результаты люминесцентного датирования отложений в бассейнах рр. Полуй, Казым, Надым и Пур можно выделить по меньшей мере 6 разновозрастных ледниковых горизонтов, относящихся среднему и позднему неоплейстоцену (рис. 7). Отложения наиболее древнего оледенения, синхронного МИС16, выявлены в верхнем течении р. Пякупур; предмаксимального оледенения, синхронного МИС12 – в верховьях р. Правая Хетта; последующего оледенения, синхронного МИС10 – в среднем течении р. Казым. К периоду МИС16-МИС10 относятся горизонты наиболее промытых («зрелых») водно-ледниковых песков, которые повсеместно встречаются на водоразделах и в цоколях речных террас. Отложения более позднего оледенения, синхронного МИС8, выявлены на водоразделе Аганского увала и Белогорской возвышенности, они отличаются обилием валунного материала. Краевой пояс морен следующего оледенения, синхронного МИС6, прослеживается в центральной водораздельной части Сибирских увалов. Именно к этой стадии, судя по полученным результатам, относится формирование характерного водно-ледникового ландшафта в бассейнах рр. Полуй, Надым, Пур, Таз, Сорум и др. Распространение

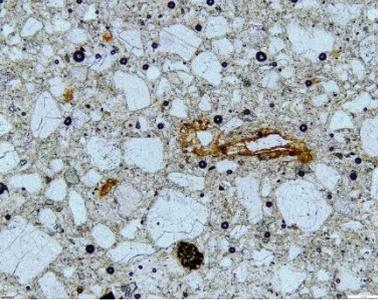
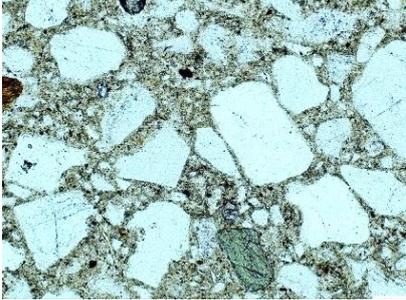
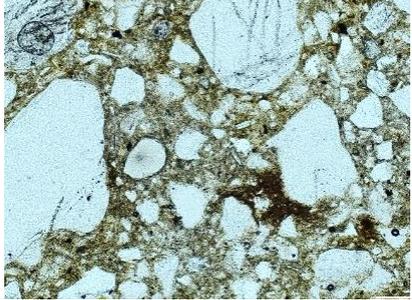
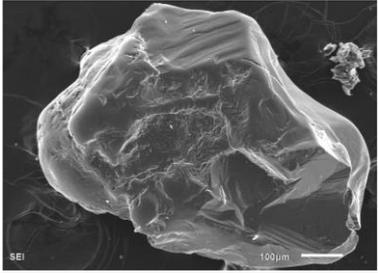
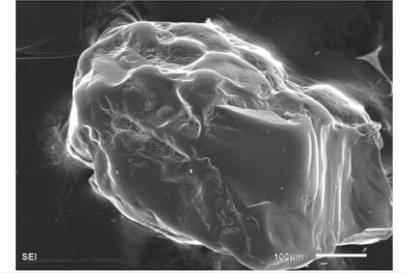
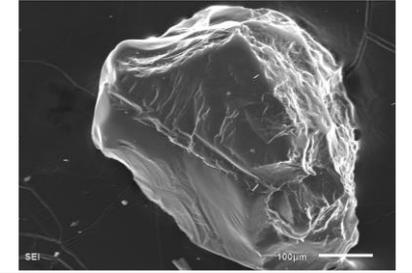
отложений последнего континентального оледенения, синхронного МИС5b-4, установлено на водоразделе Салехардской гряды.

Наибольшее влияние на развитие субэдральной формации оказали два последних ледниковых события (МИС6 и МИС4). Именно зандровые равнины и ложбины стока надымского (тазовского) оледенения, а также краевая зона карского (раннезырянского) оледенения подверглись позднее масштабной эоловой трансформации. Аккумуляции промытых песков способствовало формирование временных ледниково-подпрудных водоемов, а также накопление осадков холодного аллювия в долинах крупных рек.

Таблица 1 – Выявленные признаки ледниковых отложений

| Примеры текстур неслоистых суглинистых толщ   |  |   |
|---|--|---|
|   |   |   |
| НР-46 (Надым)   | НР-67 (Сухой Полуй)  | НР-87 (Казым)   |
| Примеры брекчирования неслоистых суглинистых толщ                                   |  |   |
|  |  |  |
| НР-30 (Пангоды)   | НР-69 (Полуй)  | НР-75 (Пур)   |
| Примеры гляциодинамических проявлений в неслоистых суглинистых толщах               |  |   |
|  |  |  |
| НР-50 (Левая Хетта) – ядро антиклинали  | НР-75 (Пур) – горизонт смешения (контакта)   | НР-79 (Пурпе) – текстуры захвата (затягивания)  |

## Продолжение таблицы 1

| Примеры шлифов неслоистых суглинистых толщ  |  |   |
|---|--|---|
|    |    |    |
| HP-58 (Салехардский увал)   | HP-76 (Айваседапур)  | HP-88 (Казым)   |
| Примеры кварцевых зерен со следами ледниковой обработки – HP-38 (Суторминское)      |  |   |
|    |    |    |
|   |  |   |
| Примеры ледниковой штриховки на поверхности валунного материала                     |  |   |
|   |    |   |
| HP-25 (Обская губа)   | HP-60 (Нгарка-Пыряха)  | HP-75 (Пур)   |
| Примеры валунов in-situ в неслоистых суглинистых толщах                             |  |   |
|  |  |  |
| HP-58 (Салехард)  | HP-65 (Бол.Хулымеган)  | HP-87 (Казым)   |
| Примеры песчаных отторженцев в неслоистых суглинистых толщах                        |  |   |
|  |  |  |
| HP-46 (Надым)   | HP-76 (Айваседапур)  | HP-87 (Казым)   |

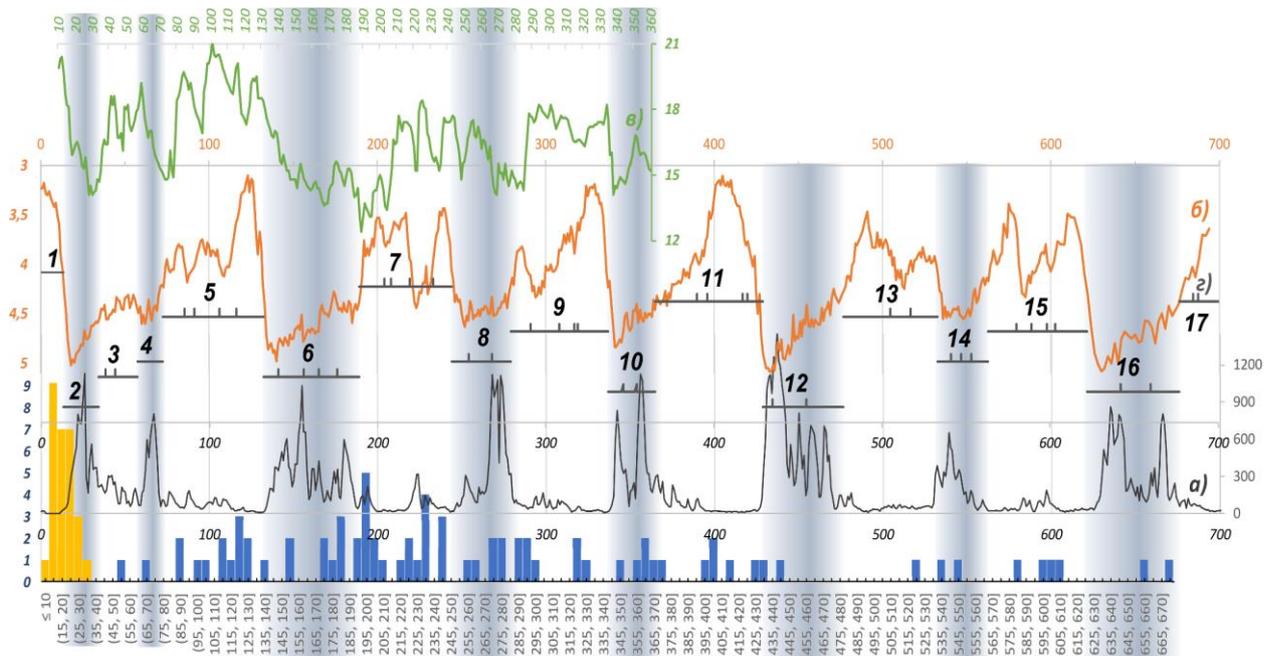


Рисунок 7 – Корреляция палеоклиматических событий и полученных ОСЛ-датировок(113) Прокси-данные: а)  $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ [Lisiecki, Raymo, 2005]; б) пыль, ng/g, EDC Erica (Антарктида) [Lambert et al., 2008]; в) температура, °C (Китай) [Thomas et al., 2017]; г) границы МИС [Railsback et al., 2015]. Датировки эоловых песков на гистограмме выделены оранжевым

Выполненный на основе полученных фактических данных и среднемасштабных ЦМР геоморфологический реанализ показал широкое распространение конечно-моренных гряд в пределах всей северной половины Западно-Сибирской равнины (рис. 8). Результаты классификации показали, что большая часть из выявленных 612 объектов, общей протяженностью порядка 20 тыс. кв.км., может быть отнесена к надымскому (тазовскому) оледенению (МИС6) (47,5% по количеству и 44,7% по протяженности), а треть – к зырянской стадии (МИС4) (33,8% и 34,0% соответственно).

Потенциально возможный внеледниковый сценарий первичного накопления седиментологически зрелых песчаных толщ в пределах рассматриваемой территории в среднем и позднем неоплейстоцене полученным в рамках данной работы обширным фактическим материалом не подтверждается.

Результаты люминесцентного датирования эоловых отложений позволяют выделить три периода эоловой активизации на севере Западной Сибири в МИС-2 (34-25, 22-17 и 16-12 тыс.л.н.) (рис. 9). Небольшие мощности эоловых образований, их мелкозернистый состав, а также отсутствие обширных древних дюнных полей свидетельствуют об ограниченном по времени и интенсивности периоде эоловой активности.

Примечательно, что динамика эолового осадконакопления слабо коррелирует с долгосрочными климатическими изменениями, реконструируемыми по ледниковым кернам Гренландии (NGRIP, GISP2 и др.). В то же время сравнительный анализ имеющихся датировок эоловых песков в других регионах (Цинхай-Тибетское нагорье, Русская равнина, Европа,

Северная Америка) показывает, что потепление позднего неоплейстоцена (известное в Европе как *Bølling-Allerød*) по всей видимости распространялось постепенно в виде своеобразной «климатической волны» с востока (юго-востока) Азии на запад (северо-запад) Европы, вслед за смещением устойчивого климатического фронта, создающего необходимый барический градиент для повышенных скоростей ветра. Накопление субэаральных осадков могло происходить в перигляциальной и прогляциальной обстановках непосредственно перед или в начале потепления, которое сопровождалось увеличением уровня водности рек и озер при сохранении переменного (сезонного) гидрологического режима (особенно в Европе и Северной Америке в связи с активной дегляциацией).

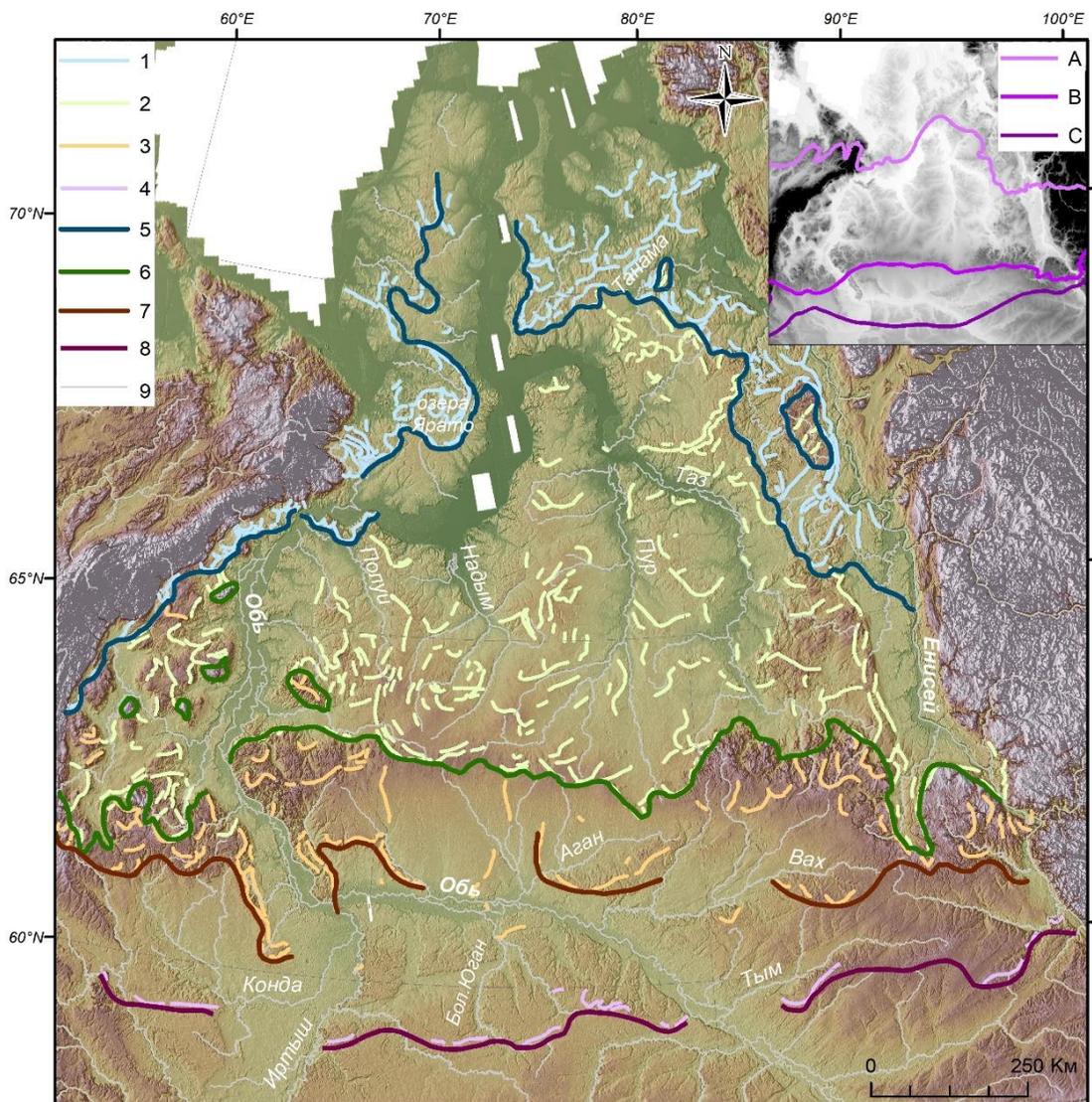


Рисунок 8 – Результаты геоморфологического реанализа: линейные формы рельефа зырянского (МИС4) (1), тазовского (МИС6) (2), самаровского (МИС8) (3) и максимального (?) (4) оледенений; границы максимального распространения зырянского (МИС4) (5), тазовского (МИС6) (6), самаровского (МИС8) (7) и максимального (?) (8) оледенений; водотоки (10). Карта-врезка – границы зырянского (МИС4) (А), тазовского (МИС6) (В), самаровского (МИС8) (С) оледенений по [Astakhov, 2013] (подложка: TanDEM90©DLR)

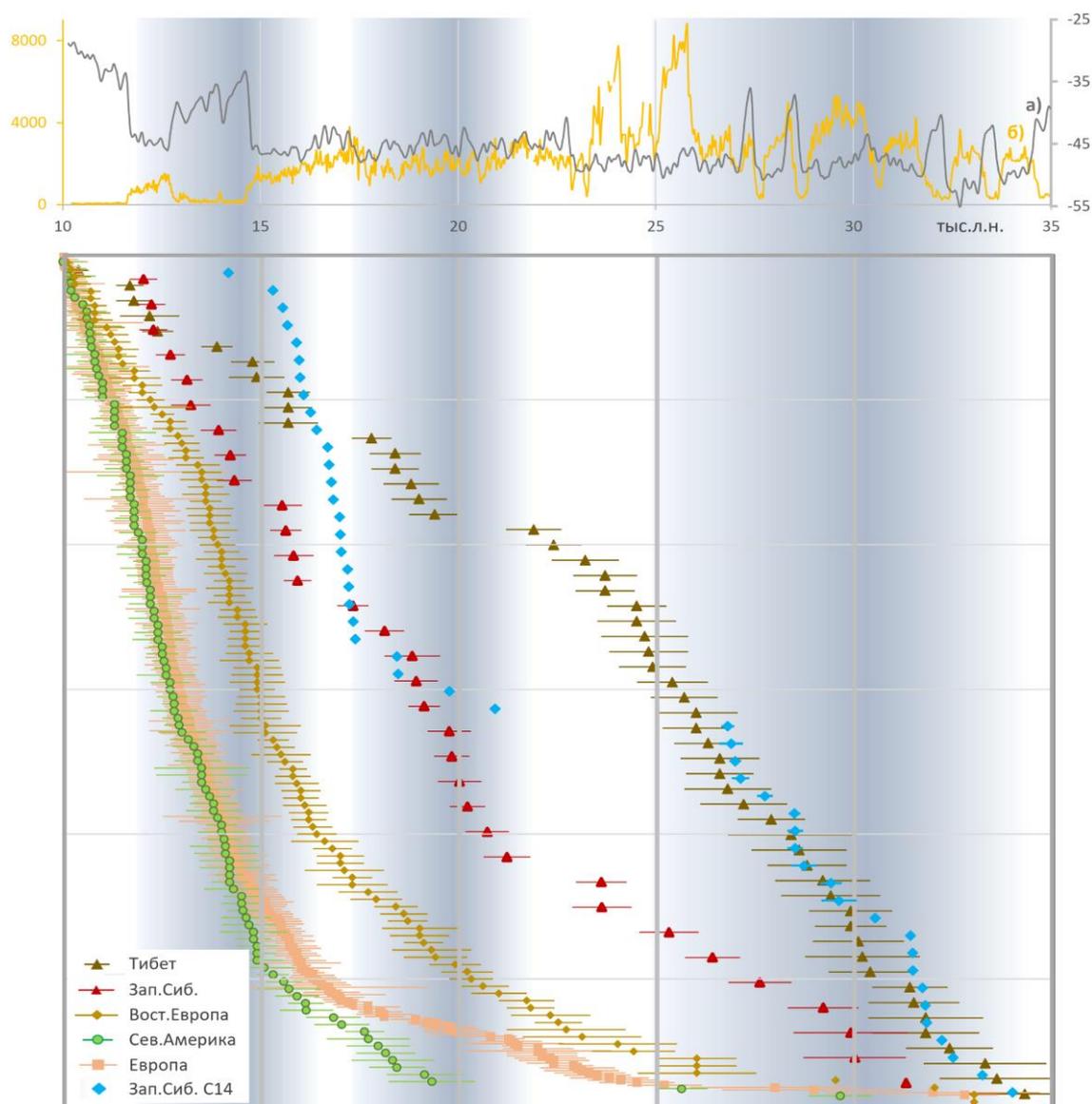


Рисунок 9 – Результаты ОСЛ-датирования эоловых отложений в различных регионах мира (период 35-10 тыс.л.н.) по результатам данного исследования, а также [Wolfe et al., 2009; Астахов, Свенсен, 2011; Lyså et al., 2014; Lancaster et al., 2016]. Прокси-данные: а) температура, °С, NGRIP (Гренландия) [Kindler et al., 2014]; б) пыль,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , NGRIP (Гренландия) [Ruth et al., 2007]

Совокупность полученных данных позволяет предположить общую последовательность эолового осадконакопления в холодных условиях:

- 1) формирование на водоразделах исходной водно-ледниковой толщи значительно выветрелых песков;
- 2) размыв водно-ледниковой толщи и формирование фации «холодного» аллювия в широких речных долинах;
- 3) активизация эоловой деятельности на водоразделах и в речных долинах во время климатических изменений в условиях повышенной водности и переменного гидрологического режима водоемов;
- 4) эрозионный врез, сохранение эоловой активности на отдельных участках, на фоне медленного и неустойчивого закрепления растительностью песков с бедным минеральным составом;

5) криогенная трансформация кварцевых зерен во время окончания основного этапа эолового осадконакопления;

б) вторичная активизация эоловой деятельности на локальных участках при благоприятных условиях – приобретение типично эоловых признаков современными подвижными песками.

Таким образом, полученные результаты прямо указывают на то, что для масштабного развития процессов ветровой эрозии в высоких широтах помимо наличия холодного климата в перигляциальной или прогляциальной зонах необходимо широкое распространение «зрелых» (в т.ч., водно-ледниковых) песков, переменный гидрологический режим водотоков и водоемов и активное воздействие кatabатических или сезонных ветров, формирующихся во время смены климатических условий.

Следовательно, при полноценной характеристике эоловой деятельности в перигляциальной зоне необходимо учитывать рельефообразующие процессы в ледниковой и прогляциальной зонах. При этом, гляциоэоловые отложения имеют значительный потенциал в качестве достоверного и устойчивого во времени палеогеографического маркера для реконструкции особенностей и изменений палеоусловий на рассматриваемой территории. В этом отношении, существующее представление Западно-Сибирской равнины в облике позднеледниковой пустыни [Величко, Тимирёва, 2005] не только подтверждается результатами проведенных геоморфологических и геологических исследований, но и является вполне закономерным в контексте гляциоэоловых процессов рельефообразования.

С другой стороны, внеледниковый сценарий широкого развития эолового рельефа на севере Сибири в плейстоцене в плане организации серьезного научного обсуждения требует поиска и привлечения соответствующего фактического материала и разработки логически непротиворечивой модели осадконакопления.

**3. На современном этапе основными климатическими параметрами, препятствующими масштабному развитию дефляции на севере Западной Сибири, являются слабая активность ветра и избыток увлажнения в теплый период на фоне относительно низких среднегодовых температур воздуха.**

Для оценки современного климатического потенциала развития дефляции использовались метеоданные с метеостанций Марресале, Антипаюта, Салехард, Надым, Тарко-Сале, Ханты-Мансийск, Александровское, Тобольск, Тара, Курган, Омск за 1966-2023 гг., данные климатического реанализа ERA5 за 2008-2017 гг., расчеты индекса аридизации (AI) Консорциума по пространственной информации CGIAR-CSI на за 1970-2000 гг., а также результаты собственных микроклиматических наблюдений в пределах модельной котловины выдувания за 2016-2023 гг.

В пределах равнины в настоящее время отсутствуют аридные условия ( $AI < 0,2$ ), южные районы до широты устья Тобола характеризуются как

полуаридные (AI в пределах 0,2-0,5). Вся территория к северу от Среднеобской низменности характеризуется гумидными условиями (AI>0,65), включая самые северные районы. При этом наибольшими среднегодовыми скоростями ветра (около 4,9 м/с) характеризуются самые северные районы равнины (Ямал и Гыдан).

Результаты расчетов индекса мобильности дюн  $M$  и климатического показателя ветровой эрозии  $C$  показали следующее (рис. 10):

- медианные значения индекса  $M$  (0,4-33,8) и показателя  $C$  (0,01-3,19) не позволяют говорить о том, что в пределах Западной Сибири существуют климатические условия для устойчивого развития ветровой эрозии;
- значение  $M$  превышало 100 (локальная активизация эоловой активности) лишь на метеостанциях Марресале (1978, 2000) и Антипаюта (1994-1997, 2005); с 1995 г. наблюдается устойчивое снижение  $M$  по всем метеостанциям; наименьшие значения отмечаются в 2017-2019 гг.;
- значения  $C$  больше 10 (повышенный риск развития ветровой эрозии) отмечены только для Марресале (10 из 52 лет наблюдений); Антипаюты (7 из 52 лет наблюдений) и Тарко-Сале (2 из 52 лет наблюдений); по остальным метеостанциям значение  $C$  не превышает 1,72.

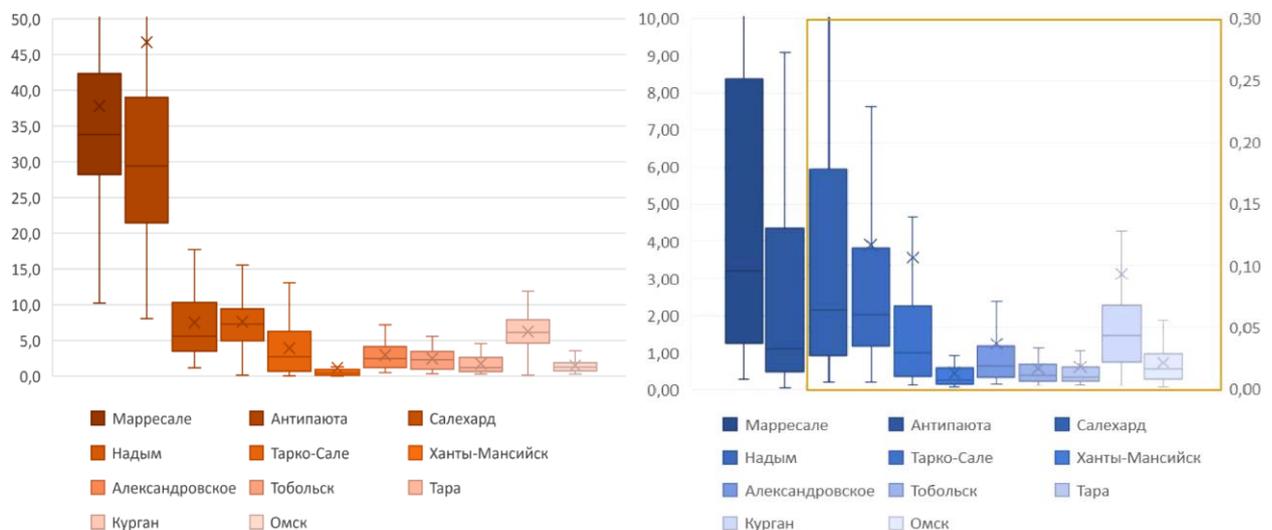


Рисунок 10 – Распределение значений индекса мобильности дюн  $M$  (слева) и показателя ветровой эрозии  $C$  (справа) за 1966-2023 гг.

Таким образом, устойчивому развитию ветровой эрозии в Западной Сибири в настоящее время препятствует слабая активность ветра и избыток увлажнения на фоне короткого теплого периода. Тем не менее, в отдельные годы значения климатических показателей могут достигать необходимого порогового уровня для кратковременной локальной активизации эолового переноса.

Сезонные полевые наблюдения с 2016 по 2023 гг. позволили выделить на примере модельной котловины выдувания в нижнем течении р. Надым ограничивающие условия, при которых возможен эоловый перенос: средняя скорость ветра на высоте 10 м – не менее 6 м/с; температура воздуха – не менее

15°C; относительная влажность воздуха – не более 80%; суммарное количество осадков за период – не более 1 мм (рис. 11).



Рисунок 11 – Эоловый перенос песка во взвешенном состоянии, южная граница модельного раздува, 15 августа 2021 г. (фото Сизова О.С.)

Суммарное за каждый год количество сроков наблюдений, при которых достигаются пороговые значения, предлагается рассматривать в качестве *относительного климатического потенциала эолового переноса* ( $\mathcal{E}_n$ ).

Динамика  $\mathcal{E}_n$ , рассчитанная по данным метеостанции Надым за 1966-2023 гг., показывает, что повышенные значения наблюдались в 2000-2016 гг., а наименьшие – в 2017-2019 гг. (рис. 12). В последнем случае значения  $\mathcal{E}_n$  хорошо коррелируют с минимальными значениями эоловой аккумуляции в пределах модельного раздува, полученными в ходе наземных измерений. Большая часть сроков наблюдений, при которых выполняются ограничивающие условия, отмечается в июне и июле (31,4 и 38,5% соответственно).

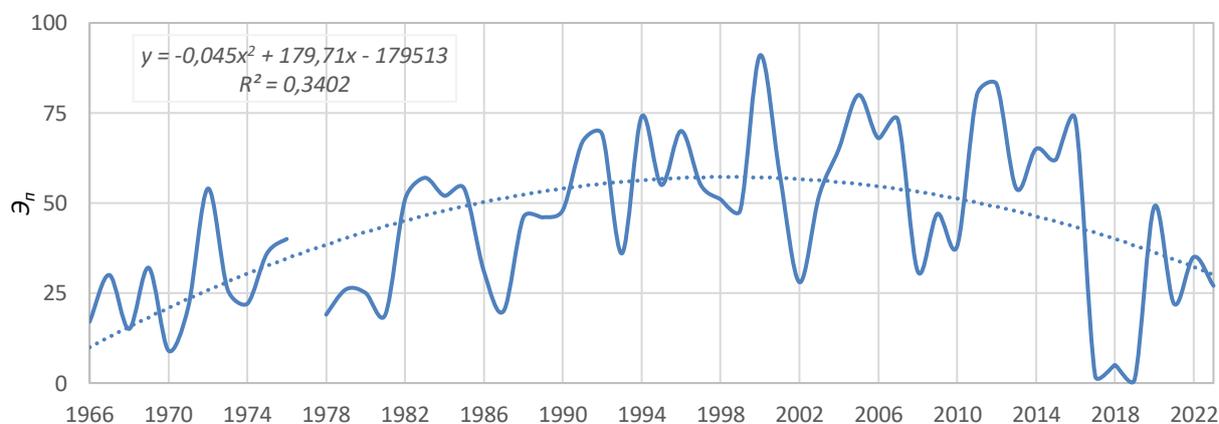


Рисунок 12 – Динамика относительного климатического потенциала эолового переноса ( $\mathcal{E}_n$ ) по данным метеостанции Надым за 1966-2023 гг.

**4 Эоловые и водно-эоловые отложения, отличающиеся бедным минеральным составом и промывным водным режимом, являются устойчивым литологическим основанием для формирования наиболее подверженных дефляции низкобонитетных лишайниковых редколесий на маломощных подзолистых почвах – характерных ландшафтных ассоциаций, которые следует рассматривать как коренные и типичные для всей рассматриваемой территории.**

В рамках изучения растительности эоловых массивов обследовано 14 участков различной степени зарастания в верхнем и среднем течении р. Надым. Описанные растительные сообщества условно делятся на 4 группы: фоновые лесные сообщества речных террас; нарушенные местообитания с локальными песчаными обнажениями; обширные песчаные обнажения с подвижными песками (раздувы); растительные анклавы на наиболее пониженных участках песчаных обнажений (раздувов) (рис. 13).



Рисунок 13 – Структура растительного покрова в пределах растительного анклава (а) и на поверхности раздува (б) (фото Жеребятъевой Н.В., 2021)

Общее видовое разнообразие растительности изученных эоловых массивов составило 51 вид, в том числе 5 видов деревьев, 4 представителя подлеска, 22 представителя травяно-кустарничкового яруса и 20 вид мхов и лишайников. При этом активные раздувы, несмотря на разреженность и неустойчивость растительного покрова, характеризуется более высоким видовым разнообразием (более 20 видов), по сравнению с участками закрепленных песков и фоновыми сообществами.

Наибольшим видовым постоянством в составе как фоновых сообществ, так и активных раздувов характеризуются лишайники рода *Cladonia* и *Cetraria*, листостебельные мхи рода *Polytrichum*, и кустарнички *Vaccinium vitis-idea* L. и *Empetrum nigrum* L., в составе древостоя наиболее устойчивы к дефляционным процессам *Pinus sylvestris* L. и *Betula pendula* Roth.

Рост биоразнообразия происходит за счет того, что появляются условия для заселения характерных представителей злаково-разнотравных

псаммофильных тундровых и лесотундровых группировок открытых местообитаний *Tanacetum bipinnatum* (L.) Sch. Bip., *Rorippa palustris* (L.) Bess, *Pericaria scabra* (Moench) Moldenke, *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop, *Festuca ovina* L. и др. Это во многом связано с разнообразием местообитаний по характеру увлажнения и экспозиции склона.

Максимальное разнообразие мхов характерно для растительных анклавов в пределах днищ котловин выдувания, где формируются более благоприятные условия увлажнения. Разнообразие лишайников возрастает по мере увеличения задернения и формирования более сомкнутого напочвенного покрова на склонах и верхних участках песчаных обнажений, достигая максимума под пологом сосновых и лиственничных лесов.

Наиболее распространенным проявлением активного взаимодействия растительности и эолового переноса в пределах песчаных раздувов являются эолово-фитогенные бугры и кочки. Основные виды, участвующие в формировании таких бугров, меняются в зависимости от уменьшения степени увлажнения закрепляемого участка. На влажных участках поселяются моховые с *Polirtichum jniperinum*, на которых далее часто закрепляются эпилитные лишайники, кустарничковые водяниковые с *Empetrum nigrum* L., реже толокнянковые с *Arctostachis uva-ursi*. Наиболее сухие и выположенные участки первоначально заселяются водорослями. Формы микрорельефа могут представлять собой как небольшие кочки высотой до 15-20 см и диаметром до 20-25 см, так и бугры высотой до 1 м и диаметром до 4-5 м и более (рис. 14а).

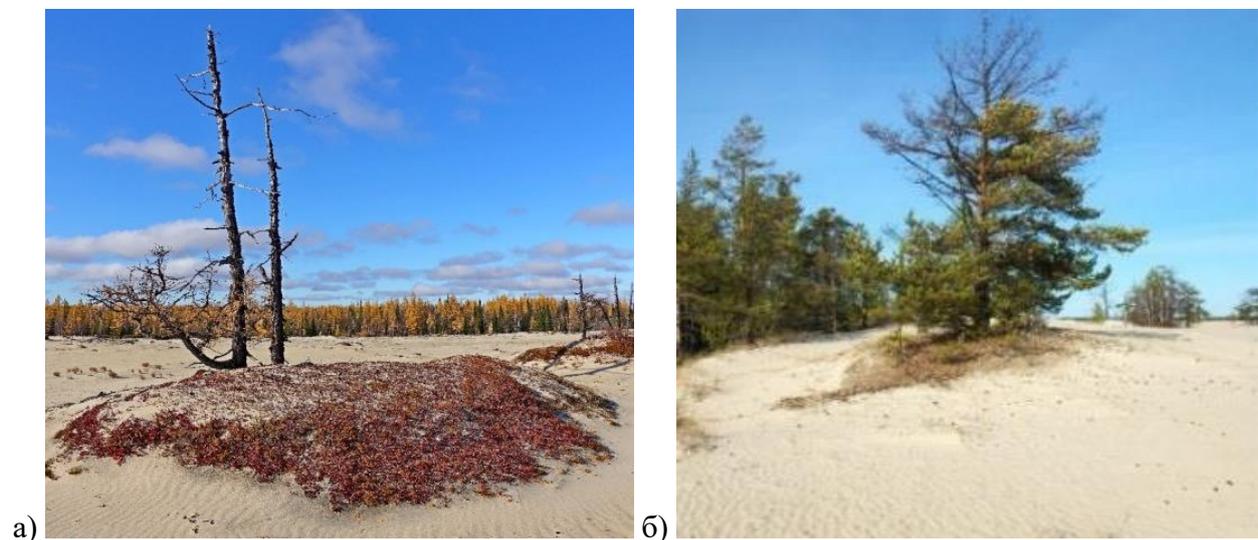


Рисунок 14 – Кустарничковый бугор полидоминантный с *Empetrum nigrum*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Ledum decumbens* в долине р. Сев. Тыдэотта (а) и эолово-древесный бугор в районе г. Муравленко (б) (фото Сизова О.С., 2023, 2021 соответственно)

Эолово-древесные бугры формируются в условиях преобладающей дефляции за счет скрепляющей силы придаточных корней отдельных деревьев [Bowers, 1982]. Центрами таких бугров в условиях субарктики Западной Сибири являются, как правило, сосна обыкновенная (*Pinus silvestris*), сосна сибирская (*Pinus sibirica*), реже лиственница (*Larix*). Кроме этого, встречаются

бугры с участием березы Каяндера (*Betula cajanderi*), березы плосколистной (*B. platyphylla*), березы тощей (*B. exilis*), ивы Бебба (*Salix bebbiana*), тополя душистого (*Populus suaveolens*). Высота таких бугров может достигать высоты в среднем 3-4 м, диаметр 7-8 м (рис. 14б). Механизм образования подобных бугров связан с низкой скоростью роста деревьев на фоне экстремальных климатических и эдафических условий, а также короткого вегетационного периода.

Оценка реакции древесных пород на эоловую аккумуляцию показала, что динамика ежегодного радиального прироста лиственниц и кедров, засыпаемых по периферии модельного раздува, практически не отличается от динамики прироста деревьев на контрольных участках – многолетние колебания в целом повторяются и признаков явного угнетения не наблюдается. Можно сделать вывод, что древесная растительность характеризуется высокой степенью устойчивости к эоловым наносам, выступая естественным барьером для расширения котловин выдувания.

На поверхности песчаных дюн в зависимости от местоположения растительность образует сопряженные зоны с различными условиями и особенностями фитоценозов [Лоботросова, 2020; Soromotin et al., 2024]: наветренный склон – характеризуется максимальным ветровым воздействием и полным отсутствием растительности; вершина – растительность представлена пижмово-овсяницевым фитоценозом; подветренные склоны – растительность представлена овсянице-вейниковым фитоценозом; междюнная котловина – растительность представлена овсянице-политриховым фитоценозом (рис. 15).

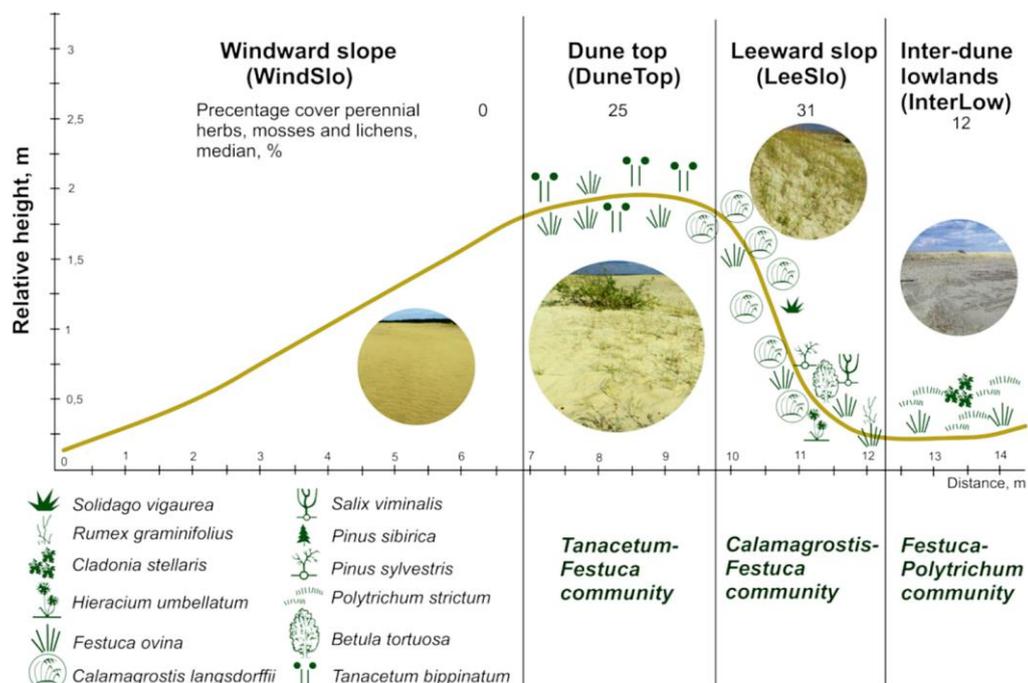


Рисунок 15 – Поперечный геоботанический профиль активной дюны в центральной части модельной котловины выдувания [Soromotin et al., 2024]

При длительном снижении ветровой нагрузки зарастание песка сопровождается вытеснением псаммофитов и заселением представителей местной флоры, приспособленных к песчаным почвам. Процесс закрепления подвижных песков зависит от площади песчаных обнажений, средней скорости ветра и количества увлажнения. В целом его можно представить как отдельный эоловый экзогенетический (аллогенный) тип первичной сукцессии, имеющей циклический или линейный характер (рис. 16).

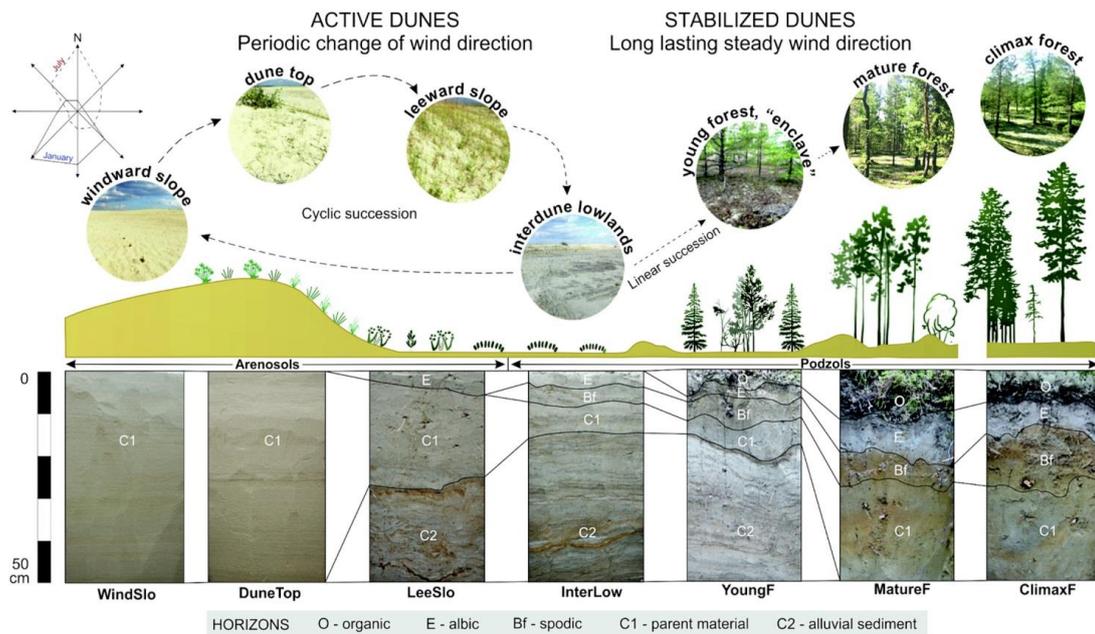


Рисунок 16 – Сукцессия фитоценозов песчаного раздува [Soromotin et al., 2024]

*Циклическая сукцессия* на подвижных песках соответствует закономерной смене растительности на основных элементах эолового микрорельефа (наветренный склон, вершина дюны, подветренный склон, междюнная котловина) и включают следующие стадии:

I – отсутствие растительности на наветренных склонах гряд или дюн, которые представляют собой первичный экотоп для заселения;

II – заселение на песчаной поверхности дерновинных видов (например, овсяница овечья), которые создают препятствия для перемещения песка в виде микробугорков, осваиваемых длинокорневищными и стержнекорневыми видами (пижма дваждыперистая и др.);

III – снижение ветровой нагрузки и развитие длинокорневищных, дерновинных и стержнекорневых злаков – фитоценозы одноярусные, доминирует вейник Лангсдорфа и овсяница овечья, присутствуют ястребинка зонтичная, щавель злаколистный, а также нередко ивы и березы.

*Линейная сукцессия* развивается при дальнейшем снижении ветровой нагрузки и включает следующие стадии:

IV – формирование мохового яруса в междюнных понижениях – заканчивается образованием овсянице-политриховых фитоценозов на супесчаном субстрате; к овсянице овечьей присоединяются споровые растения (политрихум и кладония), а также всходы сосны сибирской;

V – образование растительного анклава, в котором поселяются лишайники и некоторые виды кустарничков (багульник, голубика, черника), а также всходы деревьев (сосна обыкновенная, сосна сибирская, береза извилистая) и кустарников (ива прутовидная); результатом является лиственнично-сосновый мохово-лишайниковый фитоценоз.

В случае полного зарастания подвижных песков завершающей стадией линейной сукцессии (VI) являются сосновые или лиственничные лишайниковые леса и редколесья на автоморфных подзолистых почвах (иллювиально-железистых, иллювиально-гумусовых и др.) [Капитонова и др., 2017; Лоботросова, 2020; Soromotin et al., 2024].

Оценка противодефляционной устойчивости подзолистых почв ( $P_d$ ), учитывающей соотношение различных фракций гранулометрического состава, а также содержание гумуса в почве, показала, что наиболее уязвимы для ветровой эрозии песчаные горизонты, в то время как наличие опада, увеличение содержания гумуса или глинистой фракции повышают устойчивость почвы в целом. При этом для почти половины горизонтов подзолов и подзолов глеевых (101 из 206) получены отрицательные значения  $P_d$ , которые сопоставимы со значениями подвижных песков, что свидетельствует о крайней неустойчивости подзолистых почв к дефляции.

Важным лимитирующим фактором для расширения котловин выдувания является уровень грунтовых вод. В случае достижения дном раздува водоносного горизонта:

- при переменной влажности происходит накопление мелкодисперсного материала, однако восстановление растительности оказывается затруднено и потенциал эоловой активности сохраняется;
- при постоянном уровне влажности происходит полная стабилизация песка – в пределах дна котловины начинается линейная сукцессия, либо постепенно образуется заторфованный водоем.

В целом, на рассматриваемой территории прослеживается устойчивая и закономерная ландшафтная взаимосвязь эоловых отложений (связанных со зрелыми водно-ледниковыми осадками), лишайниковых редколесий и автоморфных подзолистых почв. Слабая дифференциация растительного и почвенного покрова на бедных питательными веществами песках обусловлена устойчивостью (и даже инертностью) кварцевой составляющей к процессам почвообразования [Мякушко и др., 1989]. В этом состоит основная литогенная специфика эдафических условий песчаных почв. При этом, экологически однородные почвенные разности, оцениваемые по ключевым показателям влажности и трофности, приурочены к однотипным элементам и формам рельефа, что позволяет использовать лишайниковые редколесья на подзолах в качестве устойчивого ландшафтного индикатора состава и генезиса отложений материнских пород на обширных по площади территориях [Сизов и др., 2017]. Более дробная ландшафтная дифференциация (мозаичность почвенного и растительного покрова) во многом определяется неоднородностью механического состава материнских пород и

приуроченностью к различным элементам мезо- и микрорельефа (склонам, вершинам, понижениям), что создает условия для перераспределения влаги и накопления глинистых частиц.

Таким образом, сосново- и лиственнично-лишайниковые редколесья на подзолистых почвах формируют достаточно устойчивый региональный ландшафтный индикатор песчаного состава почвообразующих отложений и почв – с высокой долей вероятности материнские породы здесь будут иметь признаки водной или эоловой аккумуляции и сортировки, а также отличаться бедным минеральным составом и промывным водным режимом. Данная ландшафтная особенность объединяет сервер Западной Сибири с другими районами распространения покровных оледенений на территории Русской равнины, Европы, Канады, Аляски и др.

**5. Различные виды антропогенного механического воздействия в пределах наиболее уязвимых ландшафтов лишайниковых редколесий являются основной причиной активизации ветровой эрозии, однако в современных климатических условиях с прекращением активной хозяйственной деятельности нарушенные участки развеваемых песков имеют тенденцию к естественному зарастанию.**

Развитию дефляции на севере Западной Сибири способствует нарушение почвенно-растительного покрова в связи с расширением нефтегазовой инфраструктуры. Общая площадь антропогенных участков оголенных песков по результатам проведенного дешифрирования составила порядка 300 кв.км (29% нарушенных земель ЯНАО): средняя площадь участка – 2,84 га, максимальная площадь – 4,26 кв.км. Среди 226 нефтегазовых месторождений участки антропогенной дефляции выявлены на 130 (общая площадь – 214 кв.км.) (рис. 17). Наибольшие суммарные площади выявлены в пределах Уренгойского и Суторминского месторождений (34,58 и 21,2 кв.км соответственно), наибольшая доля – в пределах Сандибинского и Суторминского месторождений (3,56 и 3,24% соответственно). Основная часть антропогенных раздувов в пределах месторождений образуется вокруг крупных промышленных узлов (ДНС, ЦДНГ, ЦППН и др.), кустовых площадок и сухоройных карьеров; за пределами месторождений – вдоль трасс магистральных трубопроводов.

Медианное значение доли изъятия земель (сумма площадей землеотвода и нарушенных участков, не связанных с дефляцией) на примере 10 нефтегазовых месторождений в верховьях р. Пур составило 7,2%. Повышенные значения выявлены для Спорышевского (13,9%) и Суторминского (11,2%) месторождений. Это можно связать с дополнительным влиянием магистральных инженерных коммуникаций, пересекающих территорию месторождений, а также с длительностью оказываемого воздействия. В обоих случаях сказывается близость городов (Ноябрьск и Муравленко, соответственно), что повышает уровень антропогенной нагрузки на окружающую территорию.

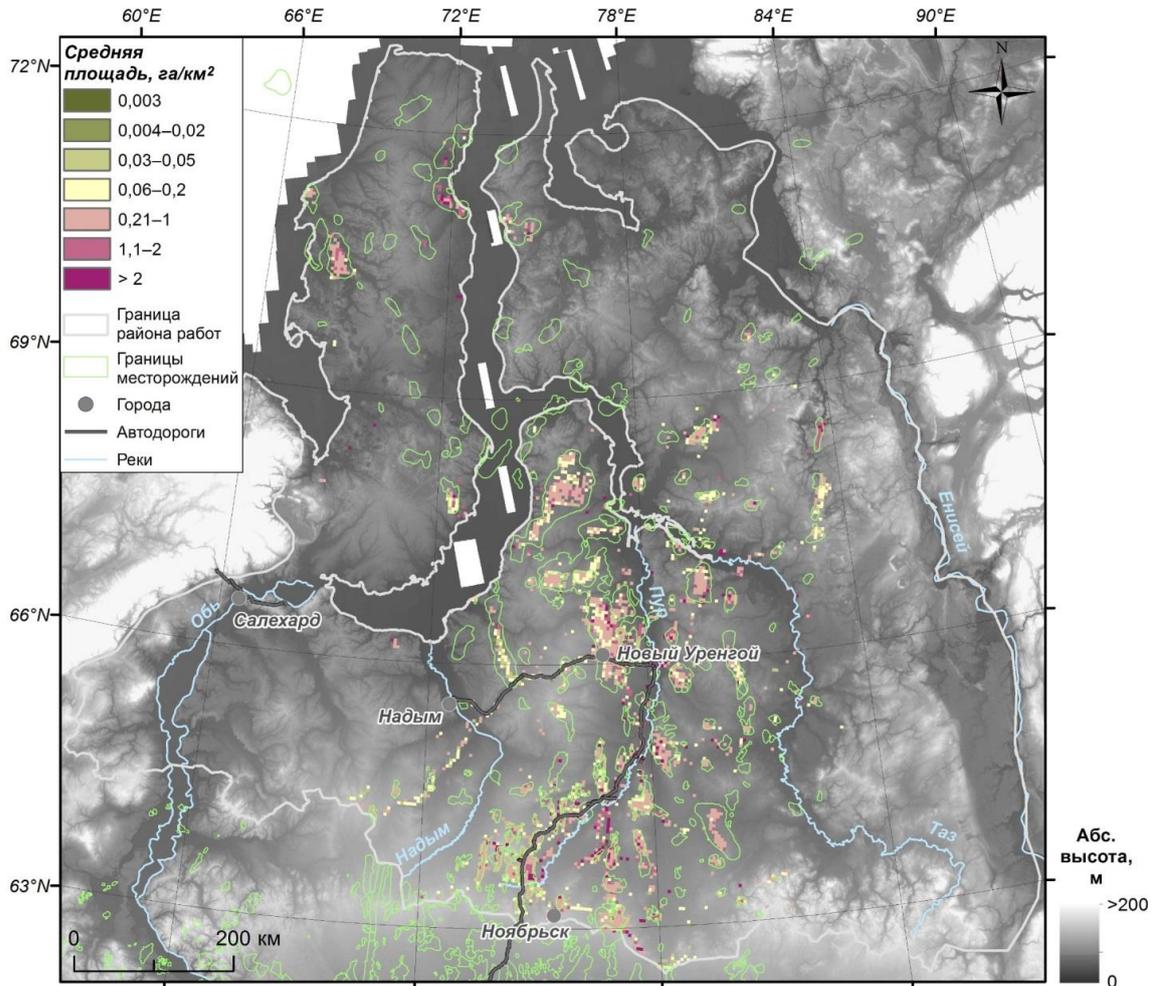


Рисунок 17 – Распространение антропогенных оголенных эоловых песков на севере Западной Сибири (средняя площадь)

Медианная доля превышения границ регламентированного механического воздействия, связанного с развитием оголенных песков и песчаных пустошей, относительно площади земледоудва (постоянного и временного) составила 9,3% при высокой вариативности (стандартное отклонение 9,5%). Минимальными превышениями (3-7%) характеризуются месторождения, находящиеся в условиях повышенной заболоченности (Еты-Пуровское, Новогоднее, Западно-Ноябрьское, Сугмутское). Максимальные превышения (более 20%), выявленные для трех месторождений (Муравленковское, Вынгаяхинское и Суторминское), обусловлены активным вовлечением в хозяйственную деятельность дренированных участков северотаежных редкостойных лесов. Расчеты ежегодного медианного значения NDVI с 1985 по 2021 гг. на основе данных Landsat-5/7/8 показывают, что примерно на 24-26 год с момента ввода месторождения в промышленную эксплуатацию начинается постепенное зарастание оголенных песков, что может отражать сокращение масштабов воздействия и проведение в отдельных случаях работ по рекультивации почвенно-растительного покрова.

Наиболее приближены к естественным условиям котловин выдувания сухоройные песчаные карьеры. На примере территории среднего и нижнего

течения р. Надым (около 50 тыс. кв. км.) в ходе исследования всего выявлено 343 карьера, из которых 47% составляют карьеры в сосново-лиственничных лишайниковых редколесьях с повышенным риском развития ветровой эрозии. Видовой состав растительности в карьерах практически не зависит от зональных особенностей. В целом, здесь отмечается низкая сомкнутость крон деревьев, на крутых склонах древостой возобновляется хуже, чем на пологих. На фоне сохранения доминирования кустарничков (толокнянки, брусники, вороники) отмечается увеличение проективного покрытия злаков (до 10-15%) и разнотравья (до 5-7%). Восстановлению растительности в карьерах препятствуют низкая влажность, низкое содержание питательных элементов и органики, а также высокая подвижность субстрата. Дефляции подвергаются днища и наветренные склоны северо-западной экспозиции – доля оголенных песков в пределах карьеров колеблется от 6,5 до 25%. При уменьшении длины и увеличении крутизны склонов доля оголенных песков значительно сокращается. Проведенные оценки показывают, что на 27-30 год после окончания разработки значения NDVI в карьерах достигают фонового уровня вне зависимости от проведения рекультивации.

Проведенное детальное исследование пирогенного воздействия на примере тестового участка в нижнем течении р. Надым показало, что пожарная опасность напрямую зависит от интенсивности хозяйственной деятельности. Следствием природных пожаров является деградация ММП за счет развития корневой системы кустарниково-древесной растительности, повышающей теплопроводность грунтов. В результате пирогенное воздействие приводит к долгосрочному замещению тундровых формаций производными сообществами кустарниково-древесной растительности. Полевые и дистанционные наблюдения показывают, что участки гарей являются ареной для быстрого и конкурентного естественного зарастания. Таким образом, в современных климатических условиях Западной Сибири пирогенное воздействие не относится к значимым факторам эоловой активизации. В то же время в холодных и засушливых условиях эоловые процессы способны развиваться вне зависимости от природных пожаров, при этом низкие температуры могут даже препятствовать распространению гарей.

Основным методом рекультивации техногенных песков на севере Западной Сибири является метод «залужения» – искусственное создание травянистых сообществ. Существует по меньшей мере два различных принципиальных подхода в агротехнике использования сеянных травосмесей: демутиация, с посевом семян многолетних трав непосредственно в песок без торфования [Зарубин и др., 1997; Губяк и др., 1998]; создание торфяно-песчаного мульчирующего слоя на поверхности рекультивируемой территории с последующим высевом семян. В рамках сравнения эффективности различных методов восстановления растительности на оголенных песках в пределах модельной котловины выдувания в 2013-2022 гг. проведено четыре эксперимента (рис. 18).



Рисунок 18 – Экспериментальная площадка рекультивации в центральной части модельной котловины выдувания: а) 2016 г.; б) 2022 г. (фото Сизова О.С.)

Результаты экспериментов показали, что ключевым подходом для улучшения технологий рекультивации оголенных песков в северотаежных условиях Западной Сибири является уменьшение скорости ветра в приземном слое. Снижение ветрового воздействия стабилизирует тепловой режим почвы, снижает потери воды и предотвращает механические повреждения корневой системы растений. Для этого могут использоваться биоматы, торфо-песчаная смесь или специальные заграждения. Посев многолетних трав в биоматы и торфо-песчаную смесь интенсифицирует естественный почвообразовательный процесс и позволяет добиться положительного эффекта уже через 1-2 года. Мероприятия по лесовосстановлению должны учитывать особенности микрорельфа участка (экспозицию и угол наклона). При рекультивации карьеров целесообразно уменьшение протяженности склонов и использование ресурсов грунтовых вод за счет увеличения глубины разработки. В целом, в современных условиях повышения температуры и влажности на севере Западной Сибири выявлена устойчивая тенденция к естественному зарастанию сухоройных песчаных карьеров и других техногенно-нарушенных участков.

**6. Эоловые массивы играют важную экосистемную роль в системе жизнеобеспечения местного населения, обеспечивая устойчивость на общем фоне деградирующей в условиях потепления многолетней мерзлоты и выступая концептуальной моделью адаптации к неблагоприятным природным условиям.**

Особенности эолово-социального взаимодействия показаны на примере г. Надым (ЯНАО), селитебная часть которого расположена в пределах крупного эолового массива. Среди ключевых задач повышения уровня жизни горожан можно выделить ветрозащиту и озеленение.

Первая задача была решена в ходе строительства путем использования аэродинамических групп жилых сооружений. По итогам проведенной

оцифровки внешних границ жилых массивов в 15 (из 22) микрорайонах города среднее значение коэффициента сомкнутости границ составило 0,11. Это означает, что практически 90% периметра микрорайонов защищено от ветра внешними стенами зданий. Метеоданные показывают, что в жилой застройке скорость ветра уменьшается на 1-1,3 м/с по сравнению с фоновыми условиями. Снижение ветровой нагрузки также отмечают жители города. Следовательно, барьерный эффект многоэтажных домов в полной мере проявляется на практике.

В рамках решения второй задачи в городе создан каркас зеленых пространств, основу которого составили два участка естественной лесной растительности – парк им. Е.Ф. Козлова и Кедровая роща. Для оценки пространственного распространения и состояния городской растительности использовался мультимасштабный ряд данных ДЗЗ: экстрадетальный уровень (снимки с БПЛА с разрешением 13 см); высокодетальный уровень (снимки из космоса с разрешением 0,3-2 м); обзорный уровень (снимки из космоса с разрешением 30 м) Результаты дешифрирования показали, что общая площадь растительности на территории Надыма с 1968 по 2021 гг. сократилась на 34% (с 425,71 га до 280,1 га) (рис. 19).

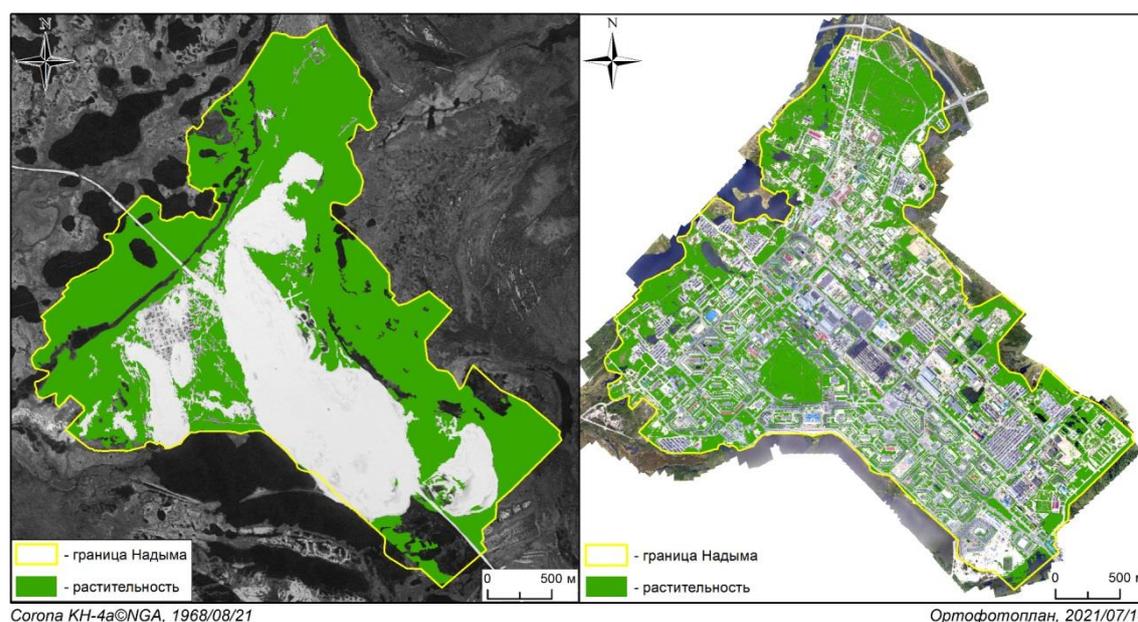


Рисунок 19 – Изменения площади растительного покрова Надыма за 1968-2021 гг.

По результатам классификации большая часть растительности в городе представлена лиственными (8%) и хвойными (14%) породами, а также кустарниками (18%). Участки естественной травянистой растительности занимают суммарно порядка 38%, из которых естественные луга занимают 7%, густые газоны – 6% и разреженные газоны (включая самосев на техногенных пустошах) – 25%. Динамика индекса NDVI на фоне динамики строительства показывает, что после завершения основного периода обустройства города начинается постепенное восстановление растительности, наблюдаемое с 2000 г. по настоящее время. Относительно NDVI и высоты

растительности можно сделать вывод, что более высокие значения характерны для западной и северной частей города (рис. 20).

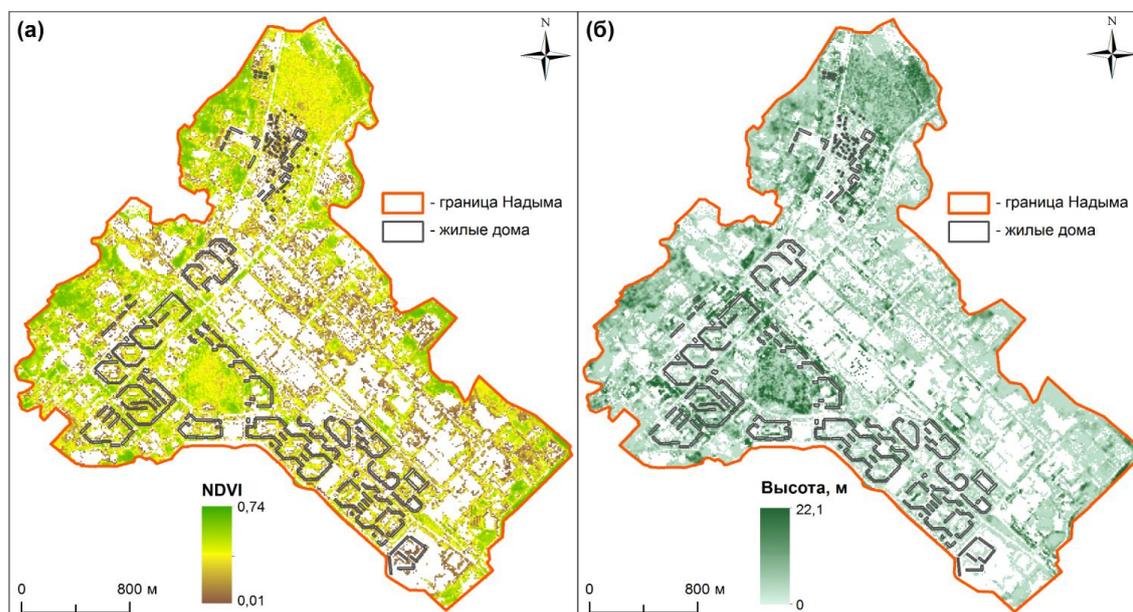


Рисунок 20 – Распределение NDVI (а) и высоты растительности (б) на территории г. Надым

Поведенные расчеты показали, что почти 90% жителей города живут в шаговой доступности (не далее 400 м) от открытых зеленых пространств. При этом если рассматривать наиболее крупные объекты (парк им Е.Ф. Козлова и Кедровая роща), то в шаговой доступности от них проживает почти 40% потенциального населения.

Предложенный показатель «зелености»  $GM$ , учитывающий среднее значение NDVI, среднее значение высоты растительности, долю зеленой растительности в общей площади микрорайона и общую потенциальную численность жителей микрорайона, демонстрирует также относительно высокий (4,8) уровень обеспеченности жителей зелеными насаждениями в пределах жилых микрорайонов.

Таким образом, результаты исследования показывают, что Надым является в целом относительно успешным примером развития городской зеленой инфраструктуры на эоловых песках в субарктических условиях.

Разработанная в рамках акторно-сетевой теории система индикаторов социально-экологического взаимодействия городского населения с эоловыми массивами предполагает рассмотрение песка (в широком смысле) в качестве неотъемлемой части регионального ландшафта; основы для размещения социальной и промышленной инфраструктуры; строительного материала; средообразующего элемента; модели адаптации. Наиболее важными свойствами эоловых массивов, определяющими их экосистемную ценность на общем фоне деградирующей многолетней мерзлоты, является устойчивость и активность. Именно эти свойства в явном или неявном виде реализует местное население в рамках концептуальной модели приспособления к суровым природным условиям севера Западной Сибири.

## Заключение

В результате исследования, проведенного с целью выявления пространственно-временных закономерностей развития процессов эолового рельефообразования в равнинных условиях севера Западной Сибири в контексте общей истории развития рельефа территории и современного хозяйственного освоения, получены следующие выводы:

1. Эоловый рельеф имеет повсеместное распространение на территории Западно-Сибирской равнины. К югу от Сибирских Увалов он представлен эоловыми гривами, коридорами (ложбинами) выдувания, барханами (барханскими цепями), эоловыми шлейфами, а также отдельными котловинами выдувания и параболическими дюнами. В северной части равнины эоловый рельеф выражен в виде отдельных песчаных массивов, котловин выдувания (раздувов), параболических дюнам и локальных участков песчаных обнажений. Основная часть антропогенных раздувов в пределах месторождений образуется вокруг крупных промышленных узлов (ДНС, ЦДНГ, ЦППН и др.), кустовых площадок и сухоройных карьеров; за пределами месторождений – вдоль трасс магистральных трубопроводов.

2. Естественные участки оголенных песков к северу югу от Сибирских Увалов суммарно занимают порядка 1922 кв.км. Средняя площадь наиболее крупных (более 1 кв.км.) природных котловин выдувания составляет 4,5 кв.км, средняя максимальная высота периферических аккумулятивных валов – 5,61 м, средняя высота продольных дюн на поверхности котловин – 1,73 м. Смещение периферических валов наиболее крупных котловин выдувания а 1960-2010-е гг. в среднем составило 0,3 м/год, продольных дюн – 0,5 м/год. Общая площадь антропогенных участков оголенных песков составила порядка 300 кв.км: средняя площадь – 2,84 га, максимальная – 4,26 кв.км.; наибольшие площади выявлены в пределах Уренгойского и Суторминского месторождений

3. Эоловые отложения на севере Западной Сибири имеют устойчивые текстурные и литологические признаки, характерные для подобных осадков в большинстве районов распространения материковых дюн Европы, Северной Америки, Южной Америки, Монголии, Цинхай-Тибетского нагорья и др. Развеванию подвергаются песчаные толщи в исходном или переотложенном состоянии, имеющие преимущественно водно-ледниковое происхождение. Парагенетически они связаны с ледниковыми отложениями и формами рельефа, широко распространенными в центральной и северной частях равнины. Внеледниковый сценарий первичного накопления «зрелых» песков в среднем и позднем неоплейстоцене полученным фактическим материалом не подтверждается. Наиболее масштабная эоловая активизация происходила в пределах зандровых равнин и ложбин стока надымского (тазовского) оледенения (МИС6), а также краевой зоны карского (раннезырянского) оледенения (МИС4) во время последнего криохрона (МИС2) (выявлены временные интервалы активизации – 34-25, 22-17 и 16-12 тыс.л.н.).

4. На современном этапе активность эоловых процессов на севере Западной Сибири определяется соотношением значений дефляционного потенциала ветра и эвапотранспирации. Основными лимитирующими факторами являются слабая активность ветра и избыток увлажнения на фоне короткого теплого периода. Пороговое значение скорости ветра для начала эолового переноса в летние месяцы составило около 6 м/с (на высоте 10 м).

5. На севере Западной Сибири прослеживается устойчивая и закономерная ландшафтная взаимосвязь эоловых (водно-эоловых) отложений, растительных сообществ и почвенного покрова. В частности, сосново- и лишайнично-лишайниковые редколесья на подзолистых почвах образуют региональный ландшафтный индикатор песчаного состава почвообразующих отложений и промывного водного режима почв. С высокой долей вероятности материнские породы здесь будут иметь признаки водной или эоловой аккумуляции и сортировки, а также отличаться бедным минеральным составом.

6. Антропогенная активизация ветровой эрозии происходит в связи с механическими нарушениями почвенно-растительного покрова в процессе освоения нефтегазовых месторождений. Наиболее приближены к исходным естественным параметрам котловин выдувания песчаные сухоройные карьеры, заложенные в лишайниковых редколесьях. Восстановлению растительности здесь препятствуют низкая влажность, низкое содержание питательных элементов и органики, а также высокая подвижность субстрата. Однако на 27-30 год после окончания разработки в подобных карьерах происходит восстановление фоновых значений биомассы вне зависимости от проведения рекультивации. В свою очередь, пирогенное воздействие в современных климатических условиях не относится к значимым факторам эоловой активизации. Основой для улучшения технологий рекультивации оголенных песков в северотаежной подзоне Западной Сибири является уменьшение скорости ветра в приземном слое.

7. Эоловые процессы, формы рельефа и производные ландшафты оказывают непосредственное воздействие на структуру расселения и систему жизнеобеспечения местных городских жителей в неблагоприятных субарктических и арктических условиях Западной Сибири. Разработанная в рамках акторно-сетевой теории система индикаторов социально-экологического взаимодействия городского населения с эоловыми массивами предполагает рассмотрение песка (в широком понимании) в качестве неотъемлемой части регионального ландшафта, а также основы для размещения социальной и промышленной инфраструктуры, строительного материала, средообразующего элемента и концептуальной модели адаптации к суровым природным условиям севера Западной Сибири.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность заслуженному экологу РФ, д.б.н. А.В. Соромотину за многолетнюю поддержку, доверие и предоставленную возможность проведения самостоятельных исследований.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Соромотин А.В., **Сизов О.С.** Активизация эоловых процессов на севере Западной Сибири в связи с возросшим антропогенным воздействием // Проблемы региональной экологии. – 2007. – № 4. – С. 12-15.

2. Соромотин А.В., Хотеев В.В., **Сизов О.С.**, Питерских А.С. Комплексное геоэкологическое описание городской среды г. Муравленко // Экология урбанизированных территорий. – 2008. – №2. – С. 34-40.

3. Ильященко В.А., **Сизов О.С.** Оценка эффективности рекультивации нефтезагрязненных земель в Среднем Приобье Западной Сибири с использованием современных методов пространственного анализа геоэкологических данных // Проблемы региональной экологии, 2016, №3, С. 120-124.

4. **Сизов О.С.**, Лоботросова С.А., Соромотин А.В. Лишайниковые сосняки северной тайги Западной Сибири как индикатор ледниковых условий рельефообразования // Проблемы региональной экологии. 2017. № 2. С. 60-68.

5. **Сизов О.С.** Дискуссионные вопросы актуализации методики среднемасштабного геоморфологического картографирования (на примере п-ова Ямал) // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 172-179.

6. **Сизов О.С.**, Вольвах А.О., Вишневикий А.В., Соромотин А.В. Литологические и геоморфологические признаки генезиса верхней толщи четвертичных отложений в нижнем течении р. Надым // Проблемы региональной экологии. 2020. № 3. С. 84-97.

7. **Сизов О.С.**, Лоботросова С.А., Соромотин А.В. Оценка физико-химических свойств верхних органо-минеральных горизонтов песчаных обнажений на севере Западной Сибири (на примере среднего течения р. Надым) // Географическая среда и живые системы. 2020. № 1. С. 31-52.

8. **Сизов О.С.** Дистанционное картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа в бассейне р. Надым (север Западной Сибири) // Географический вестник. 2020. №. 2 (53). С. 6-23.

9. Соромотин А.В., Эзау И.Н., **Сизов О.С.**, Лоботросова С.А., Франк К.А. Микrokлиматические особенности песчаных дюн северной тайги Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 88-100.

10. Жеребятъева Н.В., **Сизов О.С.** Особенности видового разнообразия и структуры растительного покрова на эоловых формах рельефа в долине р. Надым // Географическая среда и живые системы. 2022. № 2. С. 6-24.

11. Бродт Л.В., Приходько Н.В., Соромотин А.С., **Сизов О.С.** Постпирогенная трансформация растительного покрова в тундровой зоне за 5 лет // Проблемы региональной экологии. 2022. № 2. С. 62-66.

12. **Сизов О.С.**, Соромотин А.В., Лоботросова С.А., Лобжанидзе Н.Е., Приходько Н.В. Нарушенность почвенно-растительного покрова на севере Западной Сибири: пространственное распространение и способы рекультивации

// Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. № 4 (307). С. 40-46.

13. Жаркова В.В., Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е. Применение беспилотных летательных аппаратов для экологического мониторинга магистральных систем нефтепроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 5 (314). С. 59-65.

14. Сизов О.С., Федоров Р.Ю., Соромотин А.В. Оценка эффективности мер по ветрозащите населения города Надым // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 3. С. 93-102.

*В т.ч. входящих в Scopus:*

15. Сизов О.С., Лоботрсова С.А. Особенности восстановления растительности в пределах участков развееваемых песков северотаежной подзоны Западной Сибири // Криосфера Земли, 2016, т. XX. № 3. С. 3-14.

16. Зыкина В.С., Зыкин В.С., Вольвах А.О., Овчинников И.Ю., Сизов О.С., Соромотин А.В. Строение, криогенные образования и условия формирования верхнечетвертичных отложений Надымского Приобья // Криосфера Земли, 2017, т. XX, № 6, С. 14-25.

17. Сизов О.С., Зубкова К.И. Оценка заозеренности Западно-Сибирской равнины на основе глобального массива данных о водной поверхности Global Surface Water // Геодезия и картография. 2018. Т. 79. №12. С.8-21.

18. Карпухина Н.В., Сизов О.С. Методические аспекты гляциоморфологического картографирования в краевой зоне юго-восточного сектора последнего скандинавского ледникового покрова // Геоморфология. 2020. № 2. С. 21-38.

19. Сизов О.С., Цымбарович П.Р., Ежова Е.В., Соромотин А.В., Приходько Н.В. Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 137-153.

20. Сизов О.С., Юртаев А.А., Соромотин А.В., Копцева Е.М., Вольвах А.О., Абакумов Е.В., Бердников Н.М., Приходько Н.В., Гурьев Д.А. Реконструкция истории формирования торфяно-минеральной гряды пучения в нижнем течении реки Надым // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 2. С. 3-13.

21. Федоров Р.Ю., Сизов О.С., Куклина В.В., Лобанов А.А., Соромотин А.В., Печкин А.С., Печкина Ю.А., Эзау И.Н. Возможности применения концепции «зимнего города» в российской Арктике (на примере города Надым) // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 291-303.

22. Сизов О.С., Федоров Р.Ю., Печкина Ю.А., Мичугин М.С., Куклина В.В., Соромотин А.В., Федаш А.В. Оценка обеспеченности зеленой инфраструктурой жителей арктического города (на примере Надыма) // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 4. С. 475-490.

23. Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е. Пространственное распределение естественного и антропогенного эолового рельефа на севере Западной Сибири // Геодезия и картография. 2022. № 8. С. 22-32.

24. Федаш А.В., Лобжанидзе Н.Е., **Сизов О.С.**, Харьбина А.С. Корпоративная эколого-социальная ответственность современной энергетики (на примере ПАО «Газпром») // Нефтяное хозяйство. 2023. № 9. С. 60-65.

25. Бочкарев Ю.Н., Дьяконов К.Н., Соромотин А.В., **Сизов О.С.** Дендрохроноиндикация изменения местного климата городской территории Надыма за последние 50 лет // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78. № 5. С. 125-132.

*В т.ч. входящих в WoS, Scopus (переводные версии):*

26. **Sizov O.S.**, Kushnir O.V. Analysis of approaches to systematization of thematic tasks solved using remote sensing data // Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. Vol. 54. Issue № 9, pp. 1415-1421.

*Исходная статья – Сизов О.С., Кушнырь О.В. Анализ подходов к систематизации тематических задач, решаемых с помощью данных ДЗЗ // Исследование Земли из космоса. 2018. № 2. С. 77-86.*

27. **Sizov O.S.**, Idrisov I.R., Yurtaev A.A. Refining the Classification Parameters for the Bely Island (Kara Sea) Terrain Larger-Scale Image Interpretation with the Support Vector Method // Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics. 2020. Vol. 56. Issue № 12, pp. 1652-1663.

*Исходная статья – Сизов О.С., Идрисов И.Р., Юртаев А.А. Уточнение параметров классификации методом опорных векторов (SVM) при крупномасштабном картографировании арктических ландшафтов (на примере острова Белый, Карское море) // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 77-92*

*Статьи в журналах, входящих в WoS, Scopus (в т.ч., Q1):*

28. **Sizov O.**, Agoltsov A., Rubtsova N. Methodological issues of elaborating and implementing remote environmental monitoring of oil and gas exploration applying satellite images: the Priobskoye oil field (Yugra, Russia) // Energy Procedia. – 2014. – V.59. – P.51-58.

29. **Sizov O.**, Konstantinov A., Volvakh A., Molodkov A. Timing and sedimentary record of Late Quaternary fluvio-aeolian successions of the Tura-Pyshma interfluvium (SW Western Siberia, Russia) // Geosciences. 2020. Vol. 10. N. 10. p. 396.

30. **Sizov O.**, Volvakh A., Molodkov A., Vishnevskiy A., Soromotin A., Abakumov E. Lithological and geomorphological indicators of glacial genesis in the upper Quaternary strata, Nadym River basin, Western Siberia // Solid Earth. 2020. Vol. 11. N. 6. p. 2047-2074 **WoS Q1**

31. **Sizov O.**, Ezhova E., Tsymbarovich P., Soromotin A., Prihod'ko N., Petäjä T., Zilitinkevich S., Kulmala M., Bäck J., Köster K. Fire and vegetation dynamics in northwest Siberia during the last 60 years based on high-resolution remote sensing // Biogeosciences. 2021. Vol. 18. Issue 1, pp. 207-228 **WoS Q1**

32. **Sizov O.** Predictive Mapping of Glacial and Fluvioglacial Landforms in the Nadym River Basin (North of West Siberia) with TanDEM-X DEM // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2021. Vol. 14, pp. 5656-5666 **WoS Q1**

33. Fedorov R., Kuklina V., **Sizov O.**, Soromotin A., Prihodko N., Pechkin A., Krasnenko A., Lobanov A., Esau I. Zooming in on Arctic urban nature: Green and blue

space in Nadym, Siberia // Environmental Research Letters. 2021. Vol. 16. Issue 7, pp. 075009 **WoS Q1**

34. Kuklina V., **Sizov O.**, Fedorov R. Green spaces as an indicator of urban sustainability in the Arctic cities: Case of Nadym // Polar Science. 2021. Vol. 29, pp. 100672

35. Esau I., Miles V., Soromotin A., **Sizov O.**, Varentsov M., Konstantinov P. Urban heat islands in the Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote-sensing estimations // Advances in Science and Research. 2021. Vol. 18, pp. 51-57

36. Kuklina, V., **Sizov, O.**, Bogdanov, V., Krasnoshtanova, N., Morozova, A., Petrov, A. N. Combining community observations and remote sensing to examine the effects of roads on wildfires in the East Siberian boreal forest // Arctic Science. 9 (2), 2022 pp. 393-407 **Scopus Q1**

37. Kuklina, V.; **Sizov, O.**; Rasputina, E.; Bilichenko, I.; Krasnoshtanova, N.; Bogdanov, V.; Petrov, A.N. Fires on Ice: Emerging Permafrost Peatlands Fire Regimes in Russia's Subarctic Taiga // Land. 2022, 11, Vol. 3. p. 322

38. **Sizov O.S.**, Fedorov R.Yu., Pechkina Yu.A., Kuklina V.V., Michugin M., Soromotin A.V. Urban trees in the arctic city: case of Nadym // Land. 2022. 11. Vol. 4. p. 531

39. Esau I., Pettersson L.H., Cancet M., Chapron B., Chernokulsky A., Donlon C., **Sizov O.**, Soromotin A., Johannesen J.A. The arctic amplification and its impact: a synthesis through satellite observations // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. N. 5. p. 1354. **Scopus Q1**

40. Kuklina V., **Sizov O.**, Fedorov R., Butakov D. Dealing with sand in the Arctic city of Nadym // Ambio, 2023. pp. 1-13. **WoS Q1**

41. Soromotin A.V., Lanza G.R., **Sizov O.S.**, Lobotrosova S.A., Abakumov E.V., Zverev A.O., Yakimov A.S., Konstantinov A.O., Kurasova A.O., Prihod'ko N.V., Salavatulin V.M., Varentsov M.I., Alharbi S.A., Alotaibi Kh.D., Kuzyakov Ya. Cyclic and linear trajectories of ecosystem evolution on sand dunes in siberian taiga: a comprehensive analysis // Science of the Total Environment. 2024. T. 928. C. 172265. **WoS Q1**

*Публикации в прочих научных периодических изданиях:*

42. Соромотин А.В., Барышникова О.Н., Барышников Г.Я., **Сизов О.С.** Бореальные ландшафты севера Западной Сибири в условиях хозяйственного освоения // Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы, Барнаул, изд-во «Азбука», 2005. – С. 152-159.

43. Соромотин А.В., **Сизов О.С.** Природные факторы эолового рельефообразования на севере Западной Сибири на примере Суторминского нефтегазового месторождения // Геоэкологические проблемы Тюменского региона: Сборник. Выпуск 2. – Тюмень, Издательство «Вектор Бук», 2006. С. 138-146.

44. Макеев В.Н., **Сизов О.С.** Применение научно-методических достижений при создании системы экологического мониторинга на территории Югры // Промышленность и экология Севера. – 2010. – № 1. – С. 31-34.

45. Абросимов А.В., **Сизов О.С.** Дистанционное геопространственное информационное обеспечение недропользования в условиях крайнего севера:

предотвращение рисков, связанных с термоэрозией // Геоматика. – 2013. – №3. – С. 50-58.

46. Абросимов А.В., Сизов О.С. Геопространственное дистанционное обеспечение предотвращения рисков, связанных с термоэрозией, в условиях Крайнего Севера // Геопрофи. – 2013. - №6. – С. 10-14.

47. Пономарева О.Е., Москаленко Н.Г., Бердников Н.М., Бляхарчук Т.А., Бочкарев Ю.Н., Устинова Е.В., Гравис А.Г., Лоботросова С.А., Матышак Г.В., Попов К.А., Сизов О.С., Якимов А.С. Трансформация криогенных геосистем южной части Арктики Западной Сибири под влиянием потепления климата // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2015. - Выпуск № 2 (87). – С. 123-130.

48. Меньшиков С.Н., Мельников И. В., Осокин А.Б., Смолов Г.К., Беленов А.В., Абросимов А.В., Сизов О.С. Мониторинг опасных экзогенных процессов на месторождениях п-ова Ямал с использованием результатов космической съемки // Газовая промышленность, 2016, – №№7-8, – С. 39-44.

49. Соромотин А.В., Сизов О.С., Лоботросова С.А., Табуркин Л.А., Бродт Л.В., Ефимова А.А. Итоги первого полевого сезона проекта РФФИ-ЯНАО по изучению дефляционных процессов в тундровой и северо-таежных зонах Западной Сибири // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2016. – Выпуск № 4 (93). – С. 29-34.

*Монография и разделы в коллективных монографиях:*

50. Сизов О.С. Геоэкологические аспекты современных эоловых процессов северотаежной подзоны Западной Сибири [Электронный ресурс]. Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2015. – 124 с.

51. Селин В.А., Аракчеев А.Н., Емельянов К.С., Сизов О.С., Цымбарович П.Р., Славко В.Д. Исследование Арктики космическими методами // Национальный атлас Арктики. М.: Росреестр, 2017 – С. 450-453.

52. Kuklina V., Fedorov R., Sizov O., Rasputina E. Green spaces in the context of changing human-environment relations in Siberian cities // Design and the Built Environment of the Arctic. London – New York: Routledge, 2024. pp. 121-140.

*Патент Российской Федерации:*

53. Соромотин А.В., Приходько Н.В., Степанюк Е.С., Сизов О.С. Способ укрепления поверхности деградированной почвы. Патент на изобретение RU 2787505 С1, 09.01.2023.

54. Соромотин А.В., Приходько Н.В., Степанюк Е.С., Сизов О.С. Способ восстановления лишайникового покрова. Патент на изобретение RU 2793437 С1, 03.04.2023

*Учебные пособия:*

55. Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е. Практикум по курсу «Компьютерные и дистанционные методы в экологии и природопользовании»: Учебно-методическое пособие. – М.: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – 176 с.

56. Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е. Практикум по курсу «Моделирование геоэкологических процессов»: Учебно-методическое пособие. – М.: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. – 148 с.

Подписано в печать