

Отчет о выполнении проекта
№ 21-77-10102
«История развития и деградации гигантского позднеплейстоценового озера на
Камчатке»,
в период с 1 июля 2023 г. по 30 июня 2024 г.

1.1. Заявленный в проекте план работы научного исследования на отчетный период

В последний год работ по проекту подразумевается максимальный акцент на подготовке отчетных материалов. Поскольку часть результатов за отчетный период по 30 июня 2023г. не может быть представлена в отчете к 15 мая, эти работы частично отражены в плане дальнейших работ. Командировки по проекту, кроме полевых работ, не предполагаются.

Май-июль: доработка и доведение до публикации трех статей, уже подготовленных по теме проекта; организация и планирование полевых работ.

Май-октябрь: обработка полевых материалов. К началу полевых работ будет закончена обработка материалов прошлых полевых сезонов, а к октябрю предполагается полное завершение аналитических работ.

Август: полевые работы на Камчатке.

1. Изучение морены предполагаемой ледниковой подпруды к югу от влк Шивелуч; существенной проблемой геоморфологических исследований в этом районе является разделение обломочных лавин, связанных с развитием вулканической постройки и позднеплейстоценовых ледниковых отложений. В условиях крайней схожести соответствующих типов рельефа на дистанционных данных предполагается провести их разделение путем полевого картирования распространения водно-ледниковых фаций, не характерных для обломочных лавин. Датирование отложений будет опираться на тефрохронологический метод. Работы перенесены с апреля 2023г и могут быть осуществлены при стабилизации активности вулкана Шивелуч.
2. Изучение отложений предположительного времени возникновения озера (около 30 л.н.) на промежуточных гипсометрических уровнях. В связи с относительной труднодоступностью и малым количеством тефрохронологических привязок, обнажения этого уровня (обнажающиеся в речных долинах на широте пос. Таежный) являлись наименее приоритетными для основного этапа полевых работ.
3. Структурно-геоморфологические исследования активных разломов восточного борта ЦКД. Эти работы, запланированные к проведению в отчетный период 2022-2023, частично были проведены иным научным коллективом. Публикация их результатов, ожидающаяся в ближайшие месяцы, определит объем требуемых полевых неотектонических работ.

Октябрь-январь: подготовка отчетных публикаций. Основные итоги работ по проекту будут подготовлены к публикации в журнале *Geomorphology* или *Quaternary Science Reviews* (оба Q1). Кроме того, восстановленная по исследованным отложениям хронология эксплозивных извержений, вносит существенный вклад в дискуссию о дегляциации как триггере эксплозивных извержений и заслуживает отдельной публикации.

Январь-май: доработка статей на этапе рецензирования, написание итогового отчета. Мы предполагаем осуществить подачу заключительных статей по проекту не позднее января 2024 г., что позволит ожидать их публикацию к дате

итогового отчета. Выполнение плана по публикациям в течение года будет отражено на странице руководителя проекта в сети ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Egor-Zelenin>

1.2. Заявленные научные результаты на конец отчетного периода

1) Будут завершены полевые работы в Центральной Камчатской депрессии, полностью обработана коллекция образцов на гранулометрический, спорово-пыльцевой, диатомовый и тефрохронологический анализы.

2) Все первичные полевые результаты, включая описания, фотографии, колонки, схемы, а также результаты аналитических работ, независимо от их включения в отчетные публикации, будут систематизированы и связаны с рабочей геоинформационной системой (ГИС) для упрощения будущей работы исследователей.

3) На базе уже полученных и будущих тефрохронологических корреляций в ПО OxCal будет рассчитана байесовская возрастная модель позднеплейстоценовых разрезов Центральной Камчатской депрессии. Возрастная модель будет включать в себя наиболее вероятные возраста всех геохимически охарактеризованных пеплов и величину их стандартной ошибки. В качестве опорной хронологии будет использована готовящаяся к печати сводная возрастная модель пеплов из глубоководных скважин северо-запада Тихого океана (Ponomareva et al., in prep.).

4) Результаты аналитических исследований осадка будут привязаны к Байесовской возрастной модели, что позволит создать единую модель ландшафтных изменений Центральной Камчатской депрессии в исследуемый период.

5) Будут опубликованы уже подготовленные статьи, посвященные созданию геоморфологической карты Центральной Камчатской депрессии ("Geomorphological Map of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific", *Journal of Maps*, Q1), динамике рельефа ЦКД со времени последнего ледникового максимума ("Geomorphological Processes in the Central Kamchatka Depression (the Kamchatka Peninsula, NE Pacific) since the Global Last Glacial Maximum", журнал «Геоморфология и палеогеография», Q2), и статья по пыльцевым спектрам опорного разреза Кампен (*Quaternary Science Reviews*, Q1).

В составе статьи в *Journal of Maps* будет опубликован макет геоморфологической карты Центральной Камчатской депрессии масштаба 1 : 600 000 (в 1 см 6 км). Хрономорфогенетическая легенда карты будет включать в себя формы рельефа вулканического, ледникового, водно-ледникового и озерно-аллювиального генезиса (см. приложение 2). Особо будут обозначены объекты, допускающие неоднозначную интерпретацию возраста или генезиса. Картографические материалы такого рода были опубликованы только в ряде исследований, осуществленных полвека назад, и имели существенно меньшую детальность (Брайцева и др, 1968; «Камчатка, Курильские,...», 1974).

6) Будет подготовлена и опубликована обобщающая статья, включающая в себя обновленную тефрохронологическую модель (п.3) и восстановленную в результате работ по проекту общую хронологию ландшафтных изменений ЦКД (п.4), включая время наполнения и спуска палеозера. Основными выводами статьи станут возможные сценарии возникновения и спуска крупных водоемов в Центральной Камчатской депрессии, включая возможные будущие события.

1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период

1. Полевые работы.

Проводились летом 2023 года и включали в себя геоморфологические работы на пороге стока палеозера в урочище Камаки (перенесенные с апреля 2023г. из-за пароксизмального извержения вулкана Шивелуч) и изучение отложений внутри Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) (рис. 1).

Внутри ЦКД были расчищены, описаны и опробованы разрезы в береговых обрывах р. Камчатки и ее левых притоков – рек Б. Кимитиной и Караковой. В заключительный год проекта были исследованы наиболее труднодоступные объекты, необходимые для заполнения пробелов в изученности отложений ЦКД. Всего было исследовано 14

обнажений на абсолютных высотах от 16 до 150 м над уровнем моря. Характерные высоты обнажений составляли первые десятки метров, наиболее высокое обнажение – яр Смево – было непрерывно расчищено от уреза воды до высоты 69 м над урезом. Опробование проводилось с интервалом 10-20 см, для интервалов с однородной литологией – с интервалом 50 см. Были повторно посещены некоторые ранее описанные разрезы. Помимо естественных обнажений, по оси т.н. Песчаного острова (неформальное название массива стратифицированных песков в междуречье рек Камчатка и Караковая) была заложена серия шурфов, вскрывающих плащ эоловых отложений.

Полевое изучение предполагаемого порога стока палеоозера проводилось на конечно-моренном комплексе в урочище Камаки (рис. 1). Расположенный ниже по течению antecedentный участок долины р. Камчатки в урочище Большие Щеки был недавно исследован коллективом Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Кожурин и др., 2023). Их результаты достаточно полно отражают геоморфологическое строение урочища Большие Щеки, что позволило сосредоточить наши усилия на недоисследованной части сужения долины р. Камчатки.

Всего было отобрано 577 образцов на гранулометрический анализ и анализ магнитной восприимчивости, 175 образцов тефры, 69 образцов на диатомовый и спорово-пыльцевой анализ, три образца на AMS 14C датирование. Далеко не все образцы предполагалось проанализировать в отчетный период, однако мы старались накопить максимум данных, чтобы упростить последующие исследования наиболее труднодоступных объектов. Помимо описания и опробования отложений выполнялись измерения абсолютной высоты слоев с помощью геодезического ГНСС-приемника в режиме RTK, а также съемка местности с квадрокоптера с последующим расчетом цифровой модели местности и точной привязкой точек опробования к фотомозаике разреза. Первичная обработка полевых материалов включала в себя оцифровку полевых дневников, составление схем полевого дешифрирования, а также колонок описанных разрезов с расположением на них точек опробования.

2. Тефрохронологические исследования для обеспечения возрастной привязки.

Во время экспедиционных работ 2023 г. было отобрано 175 образцов тефры. Для геохимического анализа было выбрано и подготовлено (промыто, высушено, просмотрено под биноклем, залито эпоксидной смолой и отполировано) около 70 образцов, состав вулканического стекла определен в 56 образцах (более тысячи анализов индивидуальных частиц вулканического стекла). Кроме того, были проанализированы частицы стекла из нескольких образцов песка из вмещающих тефру осадков. Для оценки возраста отложений использовались корреляции содержащихся в них пеплов с пеплами ранее созданных нами ключевых тефрохронологических моделей. Это модель T30ka, разработанная для наземных отложений последних 30 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021), и модель DS6M, разработанная для пеплов с возрастом до 6.2 млн. лет из морских осадочных колонок в 600 км к востоку от Камчатки (Ponomareva et al., 2023; Zelenin et al., 2024, статья в стадии рецензии, Приложение 3). Особую сложность представляли корреляции пеплов интервала 12.5 – 25 тыс. лет. поскольку в это время на Камчатке практически отсутствовали сильные извержения, с которыми обычно связаны тефры с ярко выраженными индивидуальными особенностями составов. Единственным уникальным горизонтом тефры этого времени является пепел неизвестного источника в Среднем хребте с индексом SVK-1 и возрастом ~14.4 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021). В основном же в это время в ЦКД отлагались тефры умеренных извержений вулканов Шивелуч (Старый Шивелуч и Байдарный отрог) и Заречный, среди которых нередко встречаются пеплы со сходным составом стекла. Для различения и корреляции этих пеплов была использована серия диаграмм, специально разработанных для изучения этих тефр в ключевом разрезе KamPlen, в котором ранее было проведено детальное радиоуглеродное датирование (Ponomareva et al., 2021).

Основной задачей тефрохронологических исследований отчетного года было уточнение сводного разреза тефры, горизонты которой залегают в рыхлых отложениях ЦКД. Для этого был описан ряд разрезов вдоль всей депрессии, в частности, детальный отбор тефры был осуществлен в разрезах яров Девичий и Длинный. В яру Девичьем отмечается максимальная мощность ледниковых отложений (до 30 м), вмещающих линзы и прослои вулканических пеплов (Брайцева и др., 1968), которые нам впервые удалось опробовать. Кроме горизонтов пеплов первичного залегания мощностью от первых миллиметров до десятков сантиметров, в ряде разрезов были обнаружены горизонты песков, обогащенные "плавающими пемзами". Это гравий и лапилли пемзы, не образующие сплошного слоя, отложенные в данном месте не пеплопадом, а принесенные водой. Был проведен отбор образцов таких пемз с целью выяснения, принадлежат ли пемзы каждого горизонта определенному извержению или пемзы одинакового состава встречаются по всему разрезу, свидетельствуя о постоянном размыве пирокластики соответствующего состава.

Кроме того, был произведен отбор образцов тефры из большого количества частных разрезов для датирования

отдельных форм рельефа и пачек отложений. В частности, особое внимание было уделено детальному датированию отложений т.н. Песчаного острова (неформальное название массива стратифицированных песков в междуречье рек Камчатка и Караковая) и прислоненных к нему террас.

3. Интеграция полевых, дистанционных и лабораторных результатов.

Основным содержанием работ отчетного года являлось сведение воедино всех полученных фактических материалов для реконструкции истории позднеплейстоценового палеоозера и факторов, обусловивших его возникновение и спуск. В рамках этого блока работ были завершены исследования гранулометрического состава и магнитной восприимчивости осадка, подготовлены графические материалы по результатам диатомового, спорово-пыльцевого и гранулометрического анализа. Аналитические данные были сопоставлены с колонками, построенными по полевым описаниям, а также вынесены на геоморфологические профили и плановые схемы района работ. Были рассчитаны морфометрические характеристики русла р. Камчатки (уклон и извилистость) и бассейна в целом (растр превышения рельефа над базовой поверхностью), позволяющие выявить участки аномального врезания и аккумуляции.

При работе с фондами нами было установлено, что в районе работ вблизи поселка Ключи в 2005–2007 гг. была пройдена скважина глубиной 1513 м, а материалы этого бурения находятся в хранилище Камчатского филиала Территориального фонда геологической информации Дальневосточного Федерального округа (МНЗ рег. №: 19, 261. Инв. № 7417). Несмотря на то, что большая часть разреза сложена массивными либо гидротермально измененными лавами, авторы отчета о бурении отмечали прослой тефры и вулканического песка, указывающие на периоды терригенного осадконакопления. Для датирования этих интервалов образцы лав были переданы в ИГЕМ РАН, где было выполнено К-Аг датирование, давшее даты существенно древнее исследуемого периода (Зеленин и др., 2024, статья в стадии ревизии, Приложение 4).

В 2023-2024 гг. в рамках проекта было проведено палинологическое исследование торфа и оторфованного суглинка позднеголоценового возраста, вскрытых в керне скважины Кич, расположенной в северной части ЦКД у юго-западного подножия вулкана Шивелуч, вблизи опорного разреза палеоозера Камплен (рис. 1). Ранее на севере ЦКД ранее не было обнаружено достаточно мощных голоценовых разрезов с подходящими для проведения спорово-пыльцевого анализа осадками, а данный керн из-за высокой скорости осадконакопления обеспечивает высокую детальность исследования. Полученные результаты важны не только для выявления изменений палеогеографических условий на севере Центральной Камчатки за последние 3000 лет, но и для сопоставления с плейстоценовыми спорово-пыльцевыми данными разреза Камплен,

4. Подготовка отчетных материалов.

В отчетный период были доведены до публикации пять статей, что отражено в Форме 2о. (журналы *Journal of Maps*, «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле», «Геоморфология и палеогеография» - три статьи), еще две статьи находятся на рассмотрении в редакциях журналов после первого положительного этапа рецензий (журналы «Доклады Российской Академии наук», *Journal of Volcanology and Geothermal Research* – Приложения 3, 4), одна статья находится на доработке у иностранного соавтора.

5. Организация долгосрочного хранения и доступа к данным проекта.

Несмотря на то, что задачи проекта успешно решены, а РНФ не дает возможности продления проекта, мы продолжаем работу над этой тематикой и приветствуем вовлечение других специалистов в четвертичную геологию и палеогеографию Камчатки. В связи с этим все результаты проекта собраны и размещены в репозитории AWS CodeCommit (зеркало на Yandex Cloud и локальных компьютерах исполнителей проекта) с системой управления версиями Git.

В частности, оцифрованы и снабжены общим оглавлением все полевые дневники, отобраны и каталогизированы фотографии исследованных объектов, геопространственные данные сведены в единую ГИС, каталог образцов увязан с полевыми дневниками и ГИС. Для исполнителей проекта ранее был организован онлайн-доступ к данным проекта (https://git-codecommit.eu-north-1.amazonaws.com/v1/repos/GIS_Paleolake), который будет поддерживаться и в будущем. Также доступ может быть предоставлен по запросу любого заинтересованного специалиста, но, поскольку обсуждаемые данные не опубликованы, открытый доступ к данным мы пока обеспечить не можем.

1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде

1. Исследования отложений и рельефа ЦКД.

В ходе работ по проекту было установлено, что необходима ревизия существующих представлений о геоморфологическом строении ЦКД. Дистанционные, полевые и литературные данные позволили нам подготовить опубликованную в отчетном периоде геоморфологическую карту ЦКД (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24089719.v2>), детальность легенды которой отвечает степени изученности региона. Новые результаты позволяют уточнить возраст и происхождение форм рельефа внутри ЦКД. Это не являлось основной целью проекта, но в условиях очевидной недоизученности геоморфологии региона каждая новая датировка или описанный разрез могут внести существенный вклад в понимание геоморфологических процессов в ЦКД в целом и контекста существования палеоозера в частности.

1.1. «Песчаный остров».

Определено время и минимальная длительность накопления отложений грандиозного массива песков междуречья рек Камчатка и Караковая, так называемого Песчаного острова, имеющего плановые размеры 70*15 км и относительную высоту до 200 м. Отложения массива были исследованы в разрезе Смево (SMV на рис. 1) – они представлены горизонтальным переслаиванием средне-крупнозернистых песков и тонко-мелкозернистых песков, прослои имеют мощность до 10 см. В отложениях обнаружено несколько пеплов, корреляции которых с их аналогами в других разрезах позволили установить, что видимая часть разреза (68.8 м) накапливалась (возможно с перерывами) на протяжении многих десятков тысяч лет: для пепла на отметке 38,8 м получена дата ~40 тыс. лет, для пепла на отметке 51.7 м – около 170 тыс. лет.

Интерпретация цифровых моделей рельефа позволила установить, что песчаные отложения мощностью ~50 м, вскрытые в яру Ламутском (он же Рыбачок, RYB на рис. 1), не являются частью массива Песчаного острова, а являются прислоненной озерной террасой. В связи с крупной размерностью обнажающихся здесь горизонтально-слоистых песков горизонты тефры в них плохо выражены. Единственный датированный пепел, вскрытый на высоте 42 м над урезом, имеет возраст около 17 тыс. лет.

1.2. Речные террасы.

Впервые были получены возрастные привязки аллювиальных галечников, слагающих плейстоценовые речные террасы в ЦКД. Так, галечник на р. Б. Кимитина перекрыт стратифицированными супесями с горизонтами пеплов. Нижние пеплы, залегающие на галечнике, позволяют оценить его возраст в ~18 тыс. лет. Заполнитель в слое галечников яра Длинного (устье р. Урц) представлен маркирующим пеплом EVF-2 с возрастом 25.8 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021), что дает представление о возрасте галечника. Для пепла в пойменном аллювии террасы по левому борту р. Караковой была получена корреляция, определяющая его возраст в 14 тыс. лет. Над косослоистыми галечниками в точке 16-8 (рис. 1) идентифицирован пепел с возрастом около 170 тыс. лет, что существенно древнее залегающего выше по разрезу ранее идентифицированного пепла EVF-2 возрастом ~25 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021), что – наряду с наличием в этом интервале разрезе гальки – заставляет предполагать наличие размыва части разреза.

1.3. Древние ледниковые образования.

В ледниковых отложениях яра Девичьего (он же Крутой, KRT на рис. 1) были ранее были известны линзы и прослои пеплов (Брайцева и др., 1968) неизвестного возраста. Корреляции этих прослоев с пеплами из морских осадочных колонок позволили нам оценить время существования ледника, который достигал середины ЦКД, в 170-200 тыс. лет. Ледниковые отложения этого возраста обнажаются также в нескольких других ярах р. Камчатка, а также были датированы в долинах ее левых притоков, рек Кирганик и Андриановка.

2. Изучение порога стока.

Исходя из расположения ледниковых форм рельефа, в начале проекта базовой гипотезой являлось северное

направление стока палеоозера. После того, как полевые работы 2022 года не подтвердили эту гипотезу, работы были сфокусированы в сужении современной долины реки Камчатки на участке Камаки – Большие Щеки, где река последовательно проходит конечно-моренный комплекс последнего оледенения и воздымающийся хр. Кумроч. Полученные нами результаты (Зеленин и др, 2024, Форма 2о) показывают, что Большие Щеки являются наиболее древней и выработанной частью этого участка. Здесь ранее были впервые описаны сегменты цокольных речных террас на высотах до 10 м (Кожурин и др., 2023). Повышенные уклоны русла проявляются не в этом глубоком (свыше 500м) врезе, а выше по течению, при прохождении рекой позднеплейстоценовой моренной гряды и ниже по течению, в урочище Малые Щеки. Морфология долины позволяет считать, что опускание ЦКД относительно хребта Кумроч (или поднятие хр. Кумроч относительно ЦКД) не сконцентрировано на фронте горного хребта, а происходит на границах ступеней, разделенных активными разломами, как внутри ЦКД, так и внутри хр. Кумроч.

3. Модель развития палеоозера.

Полученные результаты позволили нам составить представление о рельефе ЦКД, существовавшем к началу изучаемого периода и датировать время озерной аккумуляции на разных высотных уровнях. Ранее нами было установлено, что озерные бассейны существовали в ЦКД неоднократно в течение среднего-позднего плейстоцена (Зеленин и др, 2022). Древние озерные отложения были описаны в среднем течении р. Камчатки, то есть относительно высоко над порогом стока. Тенденции тектонического развития ЦКД указывают на то, что даже в периоды, для которых озерные осадки неизвестны, озерные бассейны в той или иной конфигурации сохранялись в наиболее низкой части ЦКД. Даже сейчас вдоль субширотного отрезка долины р. Камчатки расположено более 400 озер суммарной площадью около 200 кв. км (что сравнимо с такими озерами, как Селигер или Ловозеро).

Историю наиболее молодого палеоозера можно отсчитывать примерно с 30 тыс. л.н. До этого времени озерное осадконакопление захватывало высоты до 200 м над у.м., что привело к формированию «Песчаного острова». Между 40 и 25 тыс. лет водоем резко сократился, что отражается в появлении речных террас на периферии Песчаного острова. Однако в северной части ЦКД непрерывное озерное осадконакопление продолжалось как минимум с 30 тыс. л.н. – более древние осадки неизвестны, поскольку перекрыты лавами Ключевской группы вулканов. Прямое датирование аллювиальных галечников в яре Длинном не позволяет объединить в единый водоем разрезы ниже и выше него по течению, как предполагалось в работе (Ponomareva et al., 2021). Таким образом, 25 тыс. л.н. высота зеркала водоема не превышала 100 м над у.м.. Затем до примерно до 17 тыс. л. происходил подъем уровня палеоозера до 120 м, приведший к накоплению материала террасы, обнажающейся в яре Ламутской (Рыбачок). Неравномерное тектоническое прогибание ЦКД (Зеленин и др, 2024) изменяло объем озерного бассейна и препятствовало формированию береговых линий. Последовавшие затем этапы спуска палеоозера были представлены в отчете 2023 года и опубликованы (Zelenin et al., 2023b).

1.5. Описание выполненных в отчетном периоде работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РФФ

на русском языке

Полученные результаты позволили нам составить представление о рельефе Центральной Камчатской депрессии (ЦКД), существовавшем к началу изучаемого периода и датировать время озерной аккумуляции на разных высотных уровнях. Ранее нами было установлено, что озерные бассейны существовали в ЦКД неоднократно в течение среднего-позднего плейстоцена (Зеленин и др, 2022). Древние озерные отложения были описаны в среднем течении р. Камчатки, то есть относительно высоко над порогом стока. Тенденции тектонического развития ЦКД указывают на то, что даже в периоды, для которых озерные осадки неизвестны, озерные бассейны в той или иной конфигурации сохранялись в наиболее низкой части ЦКД. Даже сейчас в низовьях р. Камчатки расположено более 400 озер суммарной площадью около 200 кв. км (что сравнимо с такими озерами, как Селигер или Ловозеро).

Историю наиболее молодого палеоозера можно отсчитывать примерно с 30 тыс. л.н. (рис. 4). До этого времени озерное осадконакопление захватывало высоты до 200 м над у.м., что привело к формированию так называемого «Песчаного острова» – грандиозного массива песков междуречья рек Камчатка и Караковая. Между 40 и 25 тыс. лет водоем резко сократился, что отражается в появлении речных террас возрастом около 25 тыс. лет. Однако в северной части ЦКД озерное осадконакопление продолжалось как минимум с 30 тыс. л.н. – более древние осадки неизвестны, поскольку перекрыты лавами Ключевской группы. Тephрохронологическое датирование аллювиальных галечников в яре Длинном не позволяет объединить в единый водоем разрезы ниже и выше по течению, как предполагалось в работе (Ponomareva et al., 2021). Таким образом, 25 тыс. л.н. высота зеркала водоема не превышала 100 м. Затем до примерно до 17 тыс. л. происходил подъем уровня палеоозера до 120 м, приведший к накоплению материала террасы, обнажающейся в яре Ламутской (Рыбачок). Неравномерное тектоническое прогибание ЦКД (Зеленин и др, 2024) изменяло объем озерного бассейна и препятствовало формированию береговых линий. Последовавшие затем этапы спуска палеоозера были представлены в отчете 2023 года и опубликованы (Zelenin et al., 2023b).

Отчетный год является последним годом работ по проекту. Несмотря на то, что задачи проекта успешно решены, а РФФИ не дает возможности продления проекта, мы продолжаем работу над этой тематикой и приветствуем вовлечение других специалистов в четвертичную геологию и палеогеографию Камчатки. В связи с этим все результаты проекта собраны и размещены в репозитории AWS CodeCommit (зеркало на Yandex Cloud и локальных компьютерах исполнителей проекта) с системой управления версиями Git. В частности, оцифрованы и снабжены общим оглавлением все полевые дневники, отобраны и каталогизированы фотографии исследованных объектов, геопространственные данные сведены в единую ГИС, каталог образцов увязан с полевыми дневниками и ГИС. Для исполнителей проекта ранее был организован онлайн-доступ к данным проекта, который будет поддерживаться и в будущем. Также доступ может быть предоставлен по запросу любого заинтересованного специалиста, но, поскольку обсуждаемые данные не опубликованы, открытый доступ к данным мы обеспечить не можем.

на английском языке

Our results have allowed us to preliminary reconstruct the topography of the Central Kamchatka Depression (CKD) that existed at the beginning of the period under study and to estimate the time of accumulation of lacustrine deposits at different altitudinal levels. Lake basins existed in the CKD repeatedly during the middle to late Pleistocene (Zelenin et al., 2022). Ancient lake sediments were described in the middle reaches of the Kamchatka River, i.e., relatively high above the flow threshold. Trends in the tectonic development of the CKD indicate that even during periods for which lake sediments are unknown, lake basins in some configuration were preserved in the lowest part of the CKD. Even now, more than 400 lakes with a total area of about 200 square kilometers are located in the lower reaches of the Kamchatka River.

The history of the youngest paleolake started about 30 ka BP. Before that time, lake sedimentation occurred at the altitudes up to 200 m a.s.l. and formed the "Sand Island" - a large sand massif between the Kamchatka and Karakovaya rivers. Between 40 and 25 ka, the water body shrank sharply, which is reflected in the appearance of ~25 ka old river terraces. However, in the northern part of the CKD, lacustrine sedimentation continued from at least 30 ka BP - older sediments are unknown because they are overlain by lavas of the Kliuchevskoi volcanic group. Tephrochronological dating of the alluvial gravels in the Dlinny Yar does not allow us to combine downstream and upstream segments into a single water basin, as suggested in (Ponomareva et al., 2021). Thus, at 25 ka BP, the water level in the reservoir did not exceed 100 m. Then, until about 17 ka BP, the paleolake level rose for 120 m, leading to the accumulation of terrace material exposed in the Lamutskoy (Rybachok) outcrop. The subsequent stages of paleolake drainage were published earlier (Zelenin et al., 2023b).

This year is the last one under this project. Despite the fact that the project tasks have been successfully completed and the RSF does not permit the extension, we continue to work on this topic and welcome the involvement of other specialists in Quaternary geology and paleogeography of Kamchatka. In this regard, all project results have been collected and placed in the AWS CodeCommit repository (mirrored on Yandex Cloud and local computers of the project implementers) with the Git version control system. In particular, all field journals were digitized and provided with a common table of contents, photographs of the studied objects were selected and catalogued, geospatial data were compiled into a single GIS, and the catalog of specimens was linked to the field diaries and GIS. Online access to the project data (https://git-codecommit.eu-north-1.amazonaws.com/v1/repos/GIS_Paleolake) was previously organized for the project participants and will be maintained in the future. Access can also be provided at the request of any interested specialist, but since the data discussed are not published, we cannot provide online open access.

1.7. Перечень публикаций в отчетном периоде по результатам проекта

1. Зеленин Е., Гуринов А., Гарипова С., Захаров А. (Zelenin E., Gurinov A., Garipova S., Zakharov A.) **Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific** Journal of Maps (2023 г.)

2. Пономарева В.В., Горбач Н.В., Зеленин Е.А., Портнягин М.В., Рогозин А.Н., Дирксен О.В. (Ponomareva V.V., Gorbach N.V., Zelenin E.A., Portnyagin M.V., Rogozin A.N., Dirksen O.V.) **Кальдера Крашенинникова (восточная Камчатка): возраст и магнитуда извержения** Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле (2024 г.)

3. Зеленин Е.А., Гуринов А.Л., Захаров А.Л., Пономарева В.В., Гарипова С.Т. (Zelenin E.A., Gurinov A.L., Zakharov A.L., Ponomareva V.V., Garipova S.T.) **Geomorphological Processes in the Central Kamchatka Depression (the Kamchatka Peninsula NE Pacific) During the Last 30 ka** Геоморфология и палеогеография (2023 г.)

4. Мухаметшина Е.О., Щеклеина М.Д., Захаров А.Л. (Mukhametshina E., Shchekleina M., Zaharov A.) **Изменения растительности и климата севера Центральной Камчатской депрессии в позднем голоцене** Геоморфология и палеогеография (2024 г.)

5. Зеленин Е.А., Кирякова М.Н., Мухаметшина Е.О., Захаров А.Л. (Zelenin E.A., Kiryakova M.N., Mukhametshina E.O., Zakharov A.L.) **Морфология долины реки Камчатки как отражение эндогенных процессов активной континентальной окраины** Геоморфология и палеогеография (2024 г.)

Итоговый отчет о выполнении проекта

№ 21-77-10102

«История развития и деградации гигантского позднеплейстоценового озера на Камчатке»

5.1. Заявленный в проекте план работы на весь срок выполнения проекта, предлагаемые методы и подходы (в соответствии с исходной заявкой на участие в конкурсе)

Предлагаемые нами методы и общий план работы на весь срок выполнения проекта

1. Геоморфологическое дешифрирование.

Несмотря на большой объем уже имеющихся у авторов проекта данных (описания разрезов озерных отложений, геохимия тефры, базовая тефрохронологическая модель, подобранные опубликованные карты и литература), для постановки полевых работ необходимо выполнить предварительное геоморфологическое картирование предположительной территории палеозера и предполагаемых путей его стока.

1.1. Продолжительно существовавшие озера формируют комплекс отличительных геоморфологических признаков, а именно береговые уступы, озерные и речные террасы, маркирующие уровни базиса эрозии приемного водоема. Древние абразионные уступы и речные террасы на склонах влк. Шивелуч и Ключевской группы вулканов скорее всего сnivelированы активным вуланизмом, а на склонах хр. Кумроч деформированы активной тектоникой. Поэтому основной объем работ будет сконцентрирован на многочисленных долинах, рассекающих восточный склон Срединного хребта по левому берегу р. Камчатки. Эти долины могли быть заливами озера в позднеледниковье, и именно в них при детальном дешифрировании наиболее высока вероятность обнаружить береговые уступы и высокие речные террасы притоков р. Камчатки.

1.2. Спуск крупного водоема также формирует специфические формы рельефа, контрастно отличающиеся от результата флювиального рельефообразования, адекватного современным расходам водотоков. Вблизи наиболее низких участков водоразделов ЦКД (рис. 2, приложение) дистанционные работы будут направлены на поиск следов суперпаводковой эрозии и аккумуляции: брошенных и переуглубленных долин, гигантских меандров, спиллвеев и террас в предполагаемых долинах прорыва. Далее, для определения вклада подвижек по разломам в формирование подпруды и впадины ЦКД в целом требуется более детальное структурно-геоморфологическое дешифрирование активных разломов на пересечении современного русла р. Камчатки с Восточно-Камчатской зоной разломов (хр. Кумроч). Дешифрирование и интерпретация данных дистанционного зондирования будет опираться на следующие источники: стереоснимки КН-9 Нехагон (пространственное разрешение около 5 м), гидрологически корректной цифровой модели рельефа по материалам радарной съемки HydroSHEDS (пространственное разрешение около 25 м) и наиболее детальной открытой цифровой модели местности ArcticDEM (пространственное разрешение 2 м). Проведенное картирование позволит определить ключевые участки проведения полевых исследований.

1.3. Третьим направлением дешифрирования будет являться картирование морен последнего оледенения в нижнем течении р. Камчатки, где наиболее велика вероятность перегораживания стока ледником. Опубликованные карты (Мелекесцев, 1974, Barr, Solomina, 2014) указывают на существование позднеплейстоценового ледника, перекрывающего современный сток р. Камчатка (рис. 2, приложение), однако их детальность недостаточна для обоснования этих выводов.

2. Полевые исследования будут включать следующие направления:

2.1. Детальное изучение разрезов озерных отложений, запечатлевших непрерывную летопись палеоклиматических событий и эксплозивных извержений в интервале 8-30 тысяч лет назад с отбором образцов осадка на седиментологический и палинологический анализы, а также образцов заключенной в осадке тефры для геохимических исследований и органического материала – для радиоуглеродного датирования. Отложения будут изучаться в естественных обнажениях, а где условия залегания озерных осадков этого не позволяют, будет производиться бурение ручным буром и изучение колонок кернов. Поиск и разведка новых местонахождений погребенных озерных осадочных толщ, так же будет производиться ручным буром. Для датирования ледниковых образований предполагается бурение заболоченных западин на поверхности морены ручным буром с последующим опробованием органических остатков на радиоуглеродный анализ и горизонтов тефры на тефрохронологический анализ. Вариации гранулометрического состава и содержания органического углерода, не выраженные текстурно и структурно

и неразличимые при полевом описании, могут свидетельствовать об изменениях условий осадконакопления (например, глубины водоема). Диатомовый анализ позволит реконструировать этапы развития экосистемы крупного водоема, включая изменяя его глубины, температуры воды, прозрачности, трофического статуса и т.д. Спорово-пыльцевой анализ разрезов отложений позволит выявить трансформацию растительности и колебания климата исследуемого периода.

2.2. Полевые геоморфологические исследования для заверки и датирования форм рельефа и отложений, выявленных на основе геоморфологического дешифрирования. Будут исследованы древние береговые линии - уровни палеоозера, а также проведены исследования субширотного отрезка долины р. Камчатка с выбором объектов для инструментального датирования. Особое внимание будет уделено: самым молодым и узким участкам долины (в районе пос. Ключи, в месте пересечения рекой восточной ветви морены вулкана Шивелуч и в месте вхождения реки в хр. Кумроч); зонам возможного перелива озерных вод, а также долинам по которым мог происходить катастрофический спуск озера (предположительно в северной и северо-восточной части ЦКД) Геодезическая привязка исследуемых форм и элементов рельефа будет осуществляться геодезическим ГНСС-приемником, а также нивелирной и тахеометрической съемкой (в случае одновременной работы нескольких полевых отрядов).

2.3. Палеосейсмологические работы на Восточно-Камчатской зоне разломов (восточный борт ЦКД) для определения средней скорости подвижек и амплитуд разового смещения. В рамках решаемой научной задачи проведение палеосейсмологических работ позволит оценить скорость роста восточного борта ЦКД – возможной тектонической подпруды и реконструировать рельеф ЦКД в период существования озера с учетом тектонических деформаций. К настоящему времени известен лишь плановый рисунок активных разломов и их сбросовая кинематика (Kozhurin, Zelenin, 2017). Измерения параметров разломных уступов на местности будут проводиться как методами классической геодезии (ГНСС- и нивелирная съемка), так и путем стереосъемки местности с квадрокоптера с последующим расчетом и анализом цифровых моделей местности (методика аналогична Bonali et al., 2019). Важнейшим методом полевых исследований, позволяющим охарактеризовать непосредственно плоскость разлома вблизи земной поверхности, величины разовых смещений по нему и периодах повторяемости смещений является так называемый тренинг, то есть выкапывание канавы поперек предполагаемой плоскости разлома и описание деформаций, вызванных подвижками, в стенке искусственного обнажения. Более того, интерпретация отложений в стенке канавы с той или иной точностью позволяет установить количество подвижек по разлому за время накопления вскрытых отложений, их амплитуду и возраст, а на их основе – магнитуду и повторяемость вызванных подвижками по разлому землетрясений (например McCalpin, 2009).

3. Палеовулканологические реконструкции в пределах Ключевской группы вулканов и в Шивелуч на период существования палеоозера. В рамках решаемой научной задачи проведение палеовулканологических работ необходимо для проверки гипотезы о возможной вулканической природе подпруды палеоозера. Будут реконструированы этапы изменения вулканического рельефа в течение существования озера, включая крупнейшие лавовые и пирокластические потоки, а также заложение и заполнение возможных ледоемов в районе вулканических построек. Основой для реконструкции будут как опубликованные материалы, включая данные коллектива (Пономарева, Горбач, Зеленин, 2014, Ponomareva, ..., Zelenin et al., 2021), так и результаты геоморфологического дешифрирования вулканических образований, в том числе по материалам съемки с квадрокоптера.

3.1. Для обеспечения возрастной привязки изучаемых объектов будет проведено сопоставление горизонтов тефры между удаленными разрезами с помощью изучения химического состава ее компонентов, в первую очередь, вулканического стекла (Lowe, 2011). Этот метод является ключевым методом корреляций и возрастной привязки отложений на Камчатке: каждая тефра имеет индивидуальные геохимические характеристики, позволяющие проводить точную идентификацию и корреляцию данного горизонта (например, Ponomareva et al. 2013a,b); чем в большем количестве разрезов установлен какой-либо пепел, тем большее количество дат или оценок по возрастным моделям может быть получено для этого пепла и тем точнее будут возрастные привязки всех разрезов, содержащих этот пепел. Геохимические характеристики пеплов будут получены с применением разработанного нами комплекса методов точечного анализа индивидуальных частиц стекла с помощью электронного микрозонда и масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) (например, Portnyagin, Ponomareva, Zelenin et al., 2020, Ponomareva, ..., Zelenin et al., 2017). Возрастные модели для разрезов будут создаваться на основе новых и уже полученных нами радиоуглеродных дат с помощью Байесовского возрастного моделирования. Этот подход, в частности, даст возможность рассчитать наиболее вероятные возраста широко распространенных горизонтов тефры и фитоклиматических границ из нескольких изученных разрезов, связанных надежными тефрохронологическими корреляциями. Моделирование возрастов и скоростей осадконакопления предполагается выполнять в ПО Bacon (Blaauw, Cristen, 2011), предоставляющем максимальные возможности для контроля вариабельности осадконакопления и анализа возрастной модели разреза. Согласованный расчет дат из многих разрезов предполагается проводить в ПО

OxCal (Bronk Ramsey, 2009), позволяющем включать в расчет большое количество скоррелированных разрезов и внешних дат – для проксимальных вулканических отложений, соответствующих маркирующим горизонтам тефры, и изотопно-кислородных привязок пеплов, обнаруженных в глубоководных колонках. Использование тефрохронологических корреляций и возрастного моделирования является критически важным, поскольку исследуемый интервал времени находится у границы применимости радиоуглеродного метода, а OSL-датирование на Камчатке не оправдывает себя из-за малой распространенности кварца в осадках.

4. Геоинформационное картографирование, включая картографическое моделирование геосистем, на основе пространственных данных, полученных в ходе работ по проекту. Все палеогеографические реконструкции будут представлены в виде серии карт, отражающих основные этапы наполнения и спуска палеоозера.

Осуществление нашего проекта позволит:

- Реконструировать этапы формирования крупного палеоозера в Центральной Камчатской депрессии, установить причины его образования и спуска и оценить его воздействие на природную среду.
- Существенно улучшить понимание взаимосвязи эксплозивного вулканизма и дегляциации. По мнению многих исследователей, резкое таяние ледников в начале потепления Бёллинг и в начале голоцена привело к резкому усилению вулканической активности из-за снятия ледовой нагрузки с суши. Эти выводы находят подтверждение в хронологии вулканизма Патагонских Анд (Rawson et al., 2016) и в общемировой статистике, включающей камчатские данные (Watt et al., 2013). Однако, по мере уточнения данных по активным вулканическим поясам Северной Пацифики проявляются иные временные закономерности усиления вулканической деятельности (например, Ponomareva et al., 2007, 2021).
- Уточнить пространственный охват и хронологию последнего ледникового максимума на Камчатке, а также изменения природной среды, вызванные развитием и продвижением ледников во время последнего ледникового максимума на Камчатке.
- Усовершенствовать прогноз геодинамических опасностей для ЦКД на основании комплекса палеосейсмологических и вулканологических данных, полученных в ходе работ по проекту. Интенсивность эндогенного рельефобразования указывает на возможность образования новых вулканических либо тектонических подпруд в ЦКД в ближайшем будущем. В отличие от подавляющего большинства исследований плейстоценовых палеоозер, результаты предлагаемого проекта важны для прогноза развития подобных ситуаций и оценки их воздействия на природную среду и человека. Ретроспективный анализ аналогичных событий в геологическом прошлом будет способствовать обоснованному прогнозированию таких явлений на фоне современных ускоренных изменений климата и роста антропогенной нагрузки.

Общий план работы и ожидаемые результаты (разбивка по годам приведена в соответствии с ориентировочными сроками подачи годовых отчетов):

Осень 2021 – весна 2022 г.

- подбор дистанционных данных, привязка и оцифровка опубликованных картографических материалов на район ЦКД
 - геоморфологическое дешифрирование дистанционных данных с акцентом на поиск уровней стояния озера и наиболее доступных для полевых работ обнажений.
 - полевые работы рекогносцировочного характера – контроль результатов дешифрирования, поиск перспективных разрезов, ревизия известных разрезов и бурение озерных отложений. Отбор образцов тефры и осадка из найденных разрезов озерных отложений. Геодезическая и геоморфологическая привязка опорных разрезов.
 - пробоподготовка и аналитические исследования тефры, пробоподготовка для палинологического и диатомового анализов, обработка образцов осадка для литологических исследований.
 - геоморфологическое дешифрирование дистанционных данных с установлением возможных долин стока/перелива вод палеоозера.
 - Представление первых результатов исследований по проекту на международных и всероссийских конференциях.
- Ожидаемые результаты первого года работ: рабочая ГИС для накопления пространственной информации и обмена ею, геоморфологическая схема ЦКД, коллекция образцов тефры и озерных отложений, рукопись статьи по пыльцевым спектрам опорного разреза озерных отложений на берегу Ключевского озера.

Лето 2022 – весна 2023 г.

- геоморфологическое дешифрирование дистанционных данных на участки возможных подпруд и долин прорыва.
- Основной блок полевых работ – описание и опробование выявленных ранее разрезов, сгущение сетки

шурфов/скважин для уточнения уровней стояния озера (если потребуется), рекогносцировочные работы в возможных долинах прорыва – съемка с квадрокоптера, геоморфологическая съемка, описание/опробование рыхлых отложений, палеосейсмологические работы.

- Аналитические исследования тефры и озерных отложений.

- Представление результатов исследований по проекту на международных и всероссийских конференциях.

Ожидаемые результаты: принципиальная схема развития речной сети ЦКД во второй половине позднего плейстоцена и голоцене, рукописи статей для подачи в журналы Q1 по (1) эндогенным (тектоническим и вулканическим) факторам подпруживания, (2) палеовулканологическим реконструкциям на базе разработанной тефрохронологической модели.

Лето 2023 – весна 2024 г.

- Заключительный этап полевых работ в возможных долинах прорыва – дополнительное опробование, уточнение геоморфологической позиции форм и элементов рельефа, выявленных при съемке с БПЛА, дополнительные палеосейсмологические работы (если потребуется).

- Аналитические исследования тефры и образцов осадка.

- Подготовка серии итоговых публикаций.

Ожидаемые результаты: уточненная геоморфологическая карта ЦКД, геоморфологические схемы ЦКД на этапы развития палеоозера с обоснованием его площади и объема, рукописи статей для подачи в журналы Q1 по (1) истории современного стока ЦКД и реконструкции древней долинной сети (2) реконструкции истории палеоозера.

5.2. Содержание фактически проделанной работы, полученные результаты (за все годы)

Работы по проекту следовали заявленному плану. Фактически проделанную работу можно разделить на шесть блоков.

1. Геоинформационная система для накопления и обмена данными.

В начале работ по проекту была создана геоинформационная система (ГИС) для накопления пространственных данных и обмена ими между исполнителями. Основными точками доступа к ГИС являются проекты ArcGIS и QGIS. Контроль версий осуществляется с помощью системы Git через удаленный репозиторий на AWS CodeCommit (https://git-codecommit.eu-north-1.amazonaws.com/v1/repos/GIS_Paleolake). В связи с завершением проекта в этом же репозитории размещены все результаты проекта, добавлена синхронизация с облачным хранилищем Yandex Cloud.

В частности, оцифрованы и снабжены общим оглавлением все полевые дневники, отобраны и каталогизированы фотографии исследованных объектов, геопространственные данные сведены в единую ГИС, каталог образцов увязан с полевыми дневниками и ГИС. Онлайн-доступ к данным проекта будет поддерживаться и в будущем. Также доступ может быть предоставлен по запросу любого заинтересованного специалиста, но, поскольку обсуждаемые данные не опубликованы, открытый доступ к данным мы обеспечить не можем.

2. Геоморфологическое дешифрирование и геоинформационное картографирование/

Была создана геоморфологическая карта днища Центральной камчатской депрессии масштаба 1 : 600 000 (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24089719.v2>), вошедшая в состав публикации (Zelenin et al., 2023a). В качестве основы для геоморфологического дешифрирования и картографирования были выбраны цифровая модель местности ArcticDEM и цифровая модель рельефа SRTM с динамической подстройкой количественного фона высоты, дополнительными источниками послужили безоблачная мозаика многозональных космоснимков Sentinel-2, составленная исполнителями проекта, а также снимки высокого разрешения с публичных сервисов Bing maps и Google Earth. Макет карты был уточнен по материалам полевых и дистанционных работ. Информация о вулканических формах рельефа была собрана из опубликованных источников и генерализована в соответствии с масштабом карты. Экзогенные формы рельефа были нанесены на карту в соответствии с результатами полевых работ и дешифрирования дистанционных данных. Особо обозначены объекты, допускающие неоднозначную интерпретацию возраста или генезиса. До сих пор картографические материалы такого рода были представлены только в ряде работ, опубликованных полвека назад, и имели существенно меньшую детальность (Брайцева и др., 1968; Мелекесцев и др., 1974).

Более детальные работы были посвящены районам возможных порогов стока палеоозера: пересечению рекой Камчаткой хребта Кумроч и водоразделу бассейнов рек Камчатка и Озерная (Zelenin et al., 2023b). Проведенное картографическое моделирование позволило предположить наиболее вероятные сценарии спуска палеоозера.

Были рассчитаны морфометрические характеристики русла р. Камчатки (уклон и извилистость) и бассейна в целом (растр превышения рельефа над базовой поверхностью). В отсутствие прямых геологических и геодезических свидетельств, полученные данные позволили выявить участки аномального врезания и аккумуляции, связанные с различиями в интенсивности вертикальных тектонических движений и с длительностью флювиального рельефообразования на разных участках долины р. Камчатки (Зеленин и др., 2024).

3. Экспедиционные исследования.

В пределах предполагаемого озера проведены полевые работы, направленные на изучение озерных отложений – описаны и опробованы разрезы в береговых обрывах р. Камчатки и ее притоков (рис. 1). Характерные высоты обнажений составляли первые десятки метров, наиболее высокое обнажение – яр Смево – было непрерывно расчищено от уреза воды до высоты 69 м над урезом. Кроме того, полевая геоморфологическая съемка проводилась на возможных порогах стока палеоозера: пересечении рекой Камчаткой хребта Кумроч и водоразделе бассейнов рек Камчатка и Озерная (рис. 1). На формах рельефа без естественных обнажений были заложены шурфы, ручным буром пройдены скважины глубиной от 2 до 10 м. Опробование проводилось с интервалом 10-20 см, для обнажений с однородным гранулометрическим составом отложений – с интервалом 40-50 см. Всего было отобрано порядка 1500 образцов осадка и порядка 300 образцов тефры.

Помимо описания и опробования отложений выполнялись измерения абсолютной высоты слоев с помощью геодезического ГНСС-приемника в режиме RTK, а также съемка местности с квадрокоптера с последующим расчетом цифровой модели местности и точной привязкой точек опробования. Первичная обработка полевых материалов включала в себя оцифровку полевых дневников, составление схем полевого дешифрирования, а также колонок описанных разрезов с расположением на них точек опробования.

4. Тефрохронологические исследования.

Тефрохронология – основной метод корреляции и датирования отложений на Камчатке. Для решения задач проекта в первую очередь была разработана рабочая тефростратиграфическая схема для отложений ЦКД. Схема основана на геохимических корреляциях вулканических пеплов между 16 ключевыми разрезами, начиная с обнажений по р. Андриановка, расположенных южнее пос. Мильково, и заканчивая разрезами в пос. Ключи. Расстояние между самым южным и самым северным разрезами – около 340 км. Разработка такой схемы позволила скоррелировать пачки отложений из различных ключевых и частных разрезов между собой и выстроить их в стратиграфически непротиворечивую последовательность.

Молодые пирокластические отложения вулканов Камчатки редко содержат циркон, калиевые полевые шпаты или биотит, необходимые для использования (U-Th)/He или $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ методов, а OSL-датированию вмещающих пород препятствует крайне малое содержание кварца. Поэтому для массового определения возраста пеплов за пределами возможностей радиоуглеродного метода (40-50 тыс. лет) мы использовали геохимические корреляции пеплов ЦКД с их удаленными аналогами в датированных морских и наземных отложениях. Чем в большем количестве разрезов установлен какой-либо пепел, тем большее количество дат или оценок по возрастным моделям может быть получено для этого пепла и тем точнее будут возрастные привязки всех разрезов, содержащих этот пепел. Кроме того, датирование маркирующих горизонтов пеплов, связанных с вулканическим центром Хангар, проводилось с помощью корреляций пеплов с его проксимальной пирокластикой, которую удалось датировать (U-Th)/He методом.

За время осуществления проекта получено около 5000 микрозондовых анализов по 300 образцам тефры из отложений ЦКД, которые позволили определить в их вулканическом стекле содержание главных и некоторых летучих элементов. Далее для подтверждения дальних корреляций пеплов ЦКД с пеплами из морских осадочных колонок были получены около 600 LA-ICP-MS анализов вулканического стекла по 70 образцам тефры.

Был проведен анализ полученных геохимических данных с построением парных диаграмм и с использованием разработанных нами интерактивных таблиц, позволяющих проводить статистическую проверку сходства химических характеристик тефры. Для установления корреляций между отдельными разрезами и датирования горизонтов тефры

полученные данные были сопоставлены с ранее опубликованными нами данными о составе пирокластических продуктов вулканов Камчатки (Portnyagin et al., 2020), а также с данными о составе ранее изученных нами пеплов из осадков Охотского моря и Тихого океана (Derkachev et al., 2016, 2018, 2020, 2023; Ponomareva et al., 2018, 2023), а также пеплов из отложений оз. Эльгыгытгын, Чукотка (van den Bogaard et al., 2014).

5. Аналитические исследования осадка

Для достижения целей исследования был предложен комплекс методов, включавший в себя гранулометрический анализ, анализ магнитной восприимчивости, спорово-пыльцевой и диатомовый анализ.

Гранулометрический анализ выполнялся на лазерном дифрактометре Malvern Mastersizer 3000 (позволяет получать данные об объемной доле частиц размером 2-2000 мкм). В дополнение к гранулометрическому анализу, измерялась магнитная восприимчивость (MS) на приборе ZHstruments 150-SL, позволяющая определять обогащенность образцов магнитными минералами. Разность магнитных восприимчивостей при разных частотах (FD) позволяет выделять влияние почвенных процессов (диагенетических изменений, появлений новых форм магнитных минералов) и содержание тефры в осадке. Перед измерениями проба массой 0,5-0,7 г заливалась пирофосфатом натрия и подвергалась перемешиванию на ротаторе в течение 12 часов. Затем образцы промывались и перед измерением помещались на 30 минут в ультразвуковую ванну для тщательной диспергации частиц. Для измерения магнитной восприимчивости проба высушивалась в сушильном шкафу при температуре 40 градусов Цельсия в течение 12 часов.

Лабораторная подготовка образцов для пыльцевого анализа проводилась по стандартной методике (Moore et al., 1991) с применением HCl, KOH, HF и с выполнением ацетализа. Отделение минеральной части осадка, нерастворимой в плавиковой кислоте, проводилось с помощью сит с размером ячеек 150 и 10 мкм. Обработку проходили пробы объемом 1.5-2 мл, в каждую из которых добавлялась одна таблетка специально обработанных спор *Lycopodium* для дальнейшего подсчета концентрации пыльцевых зерен (Stokmar, 1971). После обработки образец фиксировался на предметном стекле с помощью глицеринового желе. Анализ проводился на световом микроскопе Motic BA-310 с использованием увеличения в 200 раз для поиска пыльцы и в 400 раз для ее определения. В каждом образце подсчитывалось по возможности не менее 120-150 пыльцевых зерен для позднего плейстоцена и 300-500 зерен для голоцена. Обработка данных и построение спорово-пыльцевой диаграммы производилось с помощью программ TILIA, TILIA-graph (Grimm, 1990) и CorelDraw. Подсчет процентного соотношения пыльцы и спор различных таксонов для групп древесных и травянистых растений проводился от общей суммы пыльцы и спор в образце.

Диатомовый анализ проводился по стандартной методике (Диатомовые водоросли СССР, 1974). Для дезинтеграции осадка и очистки створок диатомей бралась навеска массой 80-120 г и заливалась 150 мл пирофосфата натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, после чего производилось разделение осадка путем отмучивания. Далее из полученного на предыдущем этапе осадка путем центрифугирования в пробирках с тяжелой жидкостью ГПС-В удельной массой 2,35 г/см³ выделялась легкая фракция. После чего на завершающем этапе были приготовлены постоянные препараты с использованием среды Эляшева. Таксономическое определение диатомовых водорослей проводилось на световом микроскопе МИКМЕД-3 при увеличении 1500 раз с использованием масляной иммерсии. Определение таксонов почти всегда проводилось до вида, реже до рода с помощью атласов и определителей (Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1988; Куликовский и др., 2016). Количественный подсчет створок производился до 300 штук. После окончания аналитической работы был произведен синтез полученных данных. Результаты подсчета и определения диатомей объединялись в диатомовой диаграмме и экологической таблице, в которой указывались экологические характеристики: приуроченность к местообитанию, географическая приуроченность, отношение к pH среды.

6. Представление результатов.

Результаты работ по проекту были представлены на ряде конференций:

– XXIV ежегодная научная конференции, посвящённая Дню вулканолога. Доклады «Палеоозера Центральной Камчатской депрессии в среднем и позднем плейстоцене» (Зеленин Е.А., Пономарева В.В., Портнягин М.В., Певзнер М.М., Дирксен О.В., Федоров Г.Б., Мустафин М.А.) и «Плейстоценовые озёрные отложения Камчатки как богатейший природный архив данных об эксплозивной вулканической активности в последние ~300 тысяч лет» (Пономарева В.В., Портнягин М.В., Зеленин Е.А., Певзнер М.М., Базанова Л.И., Горбач Н.В., Дирксен О.В., Пинегина Т.К., Рогозин А.Н.).

– XV Всероссийская палинологическая конференция, посвященная памяти доктора геолого-минералогических наук В.С.Волковой и доктора геолого-минералогических наук М.В.Ошурковой. Москва, 1-3 июня 2022 г. Устный доклад на тему «Природная обстановка начала и максимума последнего оледенения в Центральной Камчатской депрессии». Докладчик Мухаметшина Е.О.

– 5-я Международная конференция «Палеолимнология Северной Евразии. Санкт-Петербург, 6-9 сентября 2022 года». Доклады «Giant Late Pleistocene paleolake in the Central Kamchatka Depression (Kamchatka Peninsula, Russian Far East)». Докладчик Зеленин Е.А., «Paleoclimatic conditions of a Late Pleistocene mega-lake in Kamchatka». Докладчик Мухаметшина Е.О.

– XXVII ежегодная научная конференции, посвящённая Дню вулканолога. Доклад «Яр Девичий (Центральная Камчатская депрессия): окно в историю эксплозивного вулканизма и изменений природной среды Камчатки за последние 200 тысяч лет» (Зеленин Е.А., Пономарева В.В., Портнягин М.В., Певзнер М.М., Дирксен О.В., Федоров Г.Б., Мустафин М.А.).

В результате работ по проекту были подготовлены 10 публикаций в рецензируемых изданиях, продолжается работа над еще двумя статьями. В отчетный период были доведены до публикации пять статей, что отражено в Форме 2о. (журналы Journal of Maps, «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле», «Геоморфология и палеогеография» - три статьи), еще две статьи находятся на рассмотрении в редакциях журналов после первого положительного этапа рецензий (журналы «Доклады Российской Академии наук», Journal of Volcanology and Geothermal Research – Приложения 3, 4), Запланированная к опубликованию в отчетном периоде статья по пыльцевым спектрам опорного разреза Камплен (предполагаемый журнал Quaternary Science Reviews, Q1) все еще находится на финальной доработке у иностранного соавтора. Продолжается работа над статьей, посвященной более древнему этапу озерного осадконакопления в ЦКД (толща «синих глин») и над итоговой статьей, в которой будут представлены основные результаты проекта (ее подготовка задержана статьей по пыльцевым спектрам опорного разреза Камплен).

5.3. Основные результаты выполнения проекта

1. Исследования отложений и рельефа ЦКД.

В ходе работ по проекту было установлено, что необходима ревизия существующих представлений о геоморфологическом строении ЦКД. Дистанционные, полевые и литературные данные позволили нам опубликовать геоморфологическую карту ЦКД (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24089719.v2>), вошедшую в состав публикации (Zelenin et al., 2023a). Наши исследования позволили не только систематизировать, но и уточнить возраст и происхождение форм рельефа внутри ЦКД. Это не являлось основной целью проекта, но в условиях очевидной недоизученности геоморфологии региона каждая новая датировка или описанный разрез могут внести существенный вклад в понимание геоморфологических процессов в ЦКД в целом и контекста существования палеоозера в частности.

Для решения задач исследования наиболее значимы следующие объекты внутри ЦКД:

1.1. «Песчаный остров».

Определено время и минимальная длительность накопления отложений грандиозного массива песков междуречья рек Камчатка и Караковая, так называемого Песчаного острова, имеющего плановые размеры 70*15 км и относительную высоту до 200 м. Отложения массива были исследованы в разрезе Смево (SMV на рис. 1) – они представлены горизонтальным переслаиванием средне-крупнозернистых песков и тонко-мелкозернистых песков, прослои имеют мощность до 10 см. В отложениях обнаружено несколько пеплов, корреляции которых с их аналогами в других разрезах позволили установить, что видимая часть разреза (68.8 м) накапливалась (возможно с перерывами) на протяжении многих десятков тысяч лет: для пепла на отметке 38,8 м получена дата ~40 тыс. лет, для пепла на отметке 51.7 м – около 170 тыс. лет.

Интерпретация цифровых моделей рельефа позволила установить, что песчаные (в основании песчано-галечные) отложения мощностью ~50 м, вскрытые в яру Ламутском (он же Рыбачок, RYB на рис. 1), не являются частью массива Песчаного острова, а являются прислоненной озерной террасой. В связи с крупной размерностью обнажающихся здесь горизонтально-слоистых песков горизонты тефры в них плохо выражены. Единственный датированный пепел,

вскрытый на высоте 42 м над урезом, имеет возраст около 17 тыс. лет.

1.2. Речные террасы.

Впервые были получены возрастные привязки аллювиальных галечников, слагающих речные террасы в ЦКД. Так, галечник на р. Б. Кимитина перекрыт стратифицированными супесями с горизонтами пеплов. Нижние пеплы, залегающие на галечнике, позволяют оценить его возраст в ~18 тыс. лет. Заполнитель в слое галечников яра Длинного (устье р. Урц) представлен маркирующим пеплом EVF-2 с возрастом 25.8 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021), что дает представление о возрасте галечника. Для пепла в пойменном аллювии террасы по левому борту р. Караковой была получена корреляция, определяющая его возраст в 14 тыс. лет. Над косослоистыми галечниками в точке 16-8 (рис. 1) идентифицирован пепел с возрастом около 170 тыс. лет, что существенно древнее залегающего выше по разрезу ранее идентифицированного пепла EVF-2 возрастом ~25 тыс. лет Ponomareva et al., 2021), что – наряду с наличием в этом интервале разреза гальки – заставляет предполагать наличие размыта части разреза.

2. Изучение порога стока.

Детальные картографические работы были посвящены районам возможных порогов стока палеоозера: пересечению рекой Камчаткой хребта Кумроч и водоразделу бассейнов рек Камчатка и Озерная (Zelenin et al., 2023b). Проведенное картографическое моделирование позволило предположить наиболее вероятные сценарии спуска палеоозера.

Исходя из расположения ледниковых форм рельефа, в начале проекта базовой гипотезой являлось северное направление стока (рис. 3) палеоозера. После того, как полевые работы 2022 года не подтвердили эту гипотезу, работы были сфокусированы в сужении современной долины реки Камчатки на участке Камаки – Большие Щеки, где река последовательно проходит конечно-моренный комплекс последнего оледенения и воздымающийся хр. Кумроч. Полученные нами результаты (Зеленин и др., 2024) показывают, что Большие Щеки являются наиболее древней и выработанной частью этого участка. Здесь ранее были впервые описаны сегменты цокольных речных террас на высотах до 10 м (Кожурин и др., 2023). Повышенные уклоны русла проявляются не в этом глубоком (свыше 500м) врезе, а выше по течению, при прохождении рекой позднеплейстоценовой моренной гряды и ниже по течению, в урочище Малые Щеки. Морфология долины позволяет считать, что опускание ЦКД относительно хребта Кумроч (или поднятие хр. Кумроч относительно ЦКД) не сконцентрировано на фронте горного хребта, а происходит на границах ступеней, разделенных активными разломами, как внутри ЦКД, так и внутри хр. Кумроч.

3. Фитоклиматические реконструкции.

Опорный разрез Ключевского озера (Кампен, см. рис. 1) является уникальным по полноте и детальности возрастной привязки (Ponomareva et al., 2021) архивом палеоклиматических условий в ЦКД за последние 28 тыс. лет. По результатам спорово-пыльцевого анализа выделено 8 локальных пыльцевых зон (ЛПЗ), отражающих основные этапы изменения растительности в ЦКД в интервале между 28,4 и 7,9 тыс. калиброванных лет назад (далее тыс. л. н.).

ЛПЗ 1 (28.4-25.3 тыс. л. н.) отражает начало похолодания на рубеже МИС 3 и МИС 2. В северной части ЦКД, по всей видимости, была распространена растительность, близкая к современным сообществам субальпийского пояса – кустарниковые тундры и субальпийские луга.

ЛПЗ 2 (25.3-22.2 тыс. л. н.) соответствует условиям постепенного похолодания климата, предшествующего максимуму последнего оледенения, о чем свидетельствует появление и увеличение доли пыльцы кедрового стланика (*Pinus rimila*), карликовой березки (*Betula sect. Nanae*) и рост доли *Salix*.

ЛПЗ 3 (22.2-21.0 тыс. л. н.) продолжает постепенное похолодание климата. Присутствие пыльцы хвойных пород деревьев в отложениях этого времени говорит о том, что лесные фитоценозы сохранились, по крайней мере, небольших рефугиумов. На это время приходится пик накопления пыльцы многих луговых и высокогорных трав (*Poaceae*, *Ranunculus nivalis*, *Cichoriaceae*, *Caryophyllaceae*, *Rumex*), при этом для данного этапа характерно повышенное таксономическое разнообразие в группе NAP.

ЛПЗ 4 (21.0-18.0 тыс. л. н.) соответствует наиболее суровому периоду LGM. Для него была характерна разреженная растительность. Произрастали растения, способные выдерживать суровые климатические условия: *Koenigia*, *Dryas*, *Ranunculus nivalis*, типичные для современных высокогорных сообществ региона.

ЛПЗ 5 (18.0-14.5 тыс. л. н.) – в условиях относительно холодного и влажного климата на водосборе палеоозера были распространены открытые ландшафты с преобладанием разнотравно-злаковых сообществ; как минимум в отдельных рефугиумах сохранялась бореальная флора, что не подтверждает экстенсивного оледенения Центральной Камчатки в

этот период.

ЛПЗ 6 (14.5–12.8 тыс. л.н.) отражает разрежение растительного покрова из-за увеличения континентальности климата. На территории ЦКД преобладали травянистые сообщества с невысоким видовым разнообразием, древесная растительность практически исчезла. Однако сокращение растительного покрова сопутствовало лишь небольшому выдвиганию ледников, не отразившемуся ни в изменении типа осадконакопления, ни в его скорости.

ЛПЗ 7 (12.8–11.6 тыс. л.н.) – потепление климата привело к деградации оледенения и расширению лиственных лесов на водосборе палеоозера. Спуск озера около 11.5 тыс. л.н. и начало накопления субаэральных отложений в районе изученного разреза приблизительно соответствуют нижней границе голоцена, что является аргументом в пользу ледниковой гипотезы подпруживания палеоозера. Это же подтверждают и результаты пыльцевого анализа: на этой глубине снижается количество пыльцы и спор водных растений и их таксономическое разнообразие.

ЛПЗ 8 (11,6 – 7,9 тыс. л.н.). При переходе к голоцену заметен рост количества пыльцы ольхи волосистой (*Alnus hirsuta*), а также продолжение увеличения доли кустарниковой ольхи (*Alnus fruticosa*). Климат, вероятно, становится теплее и влажнее, в результате чего в окрестностях разреза распространялись влаголюбивые прибрежные и пойменные леса из тополя (*Populus*) и ольхи волосистой (*Alnus hirsuta*). Кроме того, в это время заметно растет концентрация пыльцы, до 200–300 тыс. пыльцевых зерен в 1 см³, и вместе с тем увеличивается доля спор в СПС, главным образом за счет спор папоротников из сем. *Polypodiaceae*.

Полученные результаты показывают, что изменения фитоклиматических условий на рубеже плейстоцена и голоцена на Камчатке происходили очень стремительно, и это выражалось в резкой смене характера растительности и соответствующих ей СПС. Это же подтверждается и другими исследователями Камчатки (Pendea et al., 2017; Брайцева и др., 1968; Мухаметшина и др., 2021). При этом изменения СПС при переходе от МИС 3 к МИС 2 были более плавными. По всей видимости, климат при переходе от позднеплейстоценового межстадиала к последнему ледниковому максимуму менялся относительно медленно.

Важно отметить присутствие в разрезе пыльцы водных растений. В настоящее время некоторые из этих растений (*Nymphaea* и *Typha latifolia*) встречаются только на юге п-ова Камчатка, предпочитая мелководные озера и речные старицы. К тому же кувшинка (*Nymphaea*) не переносит промерзания водной толщи до дна в зимний период (Федченко, 1925). Наряду с названными таксонами встречается пыльца и споры и других водных растений: полушника, болотника, рогоза, рдеста. Сам факт их присутствия указывает на озерный генезис исследуемых осадков. Кроме того, известно, что эти растения предпочитают мелководные озерные бассейны и произрастают в наше время в условиях умеренного климата (те виды, которые и сейчас произрастают на территории полуострова). При этом в осадках моложе 25,3 тыс. л.н. пыльца теплолюбивых водных растений не обнаружено, а в отложениях моложе 11,6 тыс. л.н. пыльца водных растений не встречается вовсе.

4. Модель развития палеоозера.

Полученные результаты позволили нам составить представление о рельефе ЦКД, существовавшем к началу изучаемого периода и датировать время озерной аккумуляции на разных высотных уровнях. Ранее нами было установлено, что озерные бассейны заполняли ЦКД неоднократно в течение среднего-позднего плейстоцена (Зеленин и др, 2022). Древние озерные отложения были описаны в среднем течении р. Камчатки, то есть относительно высоко над порогом стока. Тенденции тектонического развития ЦКД указывают на то, что даже в периоды, для которых озерные осадки неизвестны, озерные бассейны в той или иной конфигурации сохранялись в наиболее низкой части ЦКД. Даже сейчас вдоль субширотного отрезка долины р. Камчатки расположено более 400 озер суммарной площадью около 200 кв. км (что сравнимо с такими озерами, как Селигер или Ловозеро).

Историю наиболее молодого палеоозера можно отсчитывать примерно с 30 тыс. л.н. До этого времени озерное осадконакопление захватывало высоты до 200 м над у.м., что привело к формированию «Песчаного острова». Между 40 и 25 тыс. лет водоем резко сократился, что отражается в появлении речных террас на периферии Песчаного острова. Однако в северной части ЦКД непрерывное озерное осадконакопление продолжалось как минимум с 30 тыс. л.н. – более древние осадки неизвестны, поскольку перекрыты лавами Ключевской группы вулканов. Прямое датирование аллювиальных галечников в яре Длинном не позволяет объединить в единый водоем разрезы ниже и выше него по течению, как предполагалось в работе (Ponomareva et al., 2021). Таким образом, 25 тыс. л.н. высота зеркала водоема не превышала 100 м над у.м.. Затем до примерно до 17 тыс. л. происходил подъем уровня палеоозера до 120 м, приведший к накоплению материала террасы, обнажающейся в яре Ламутской (Рыбачок). Неравномерное тектоническое прогибание ЦКД (Зеленин и др, 2024) изменяло объем озерного бассейна и препятствовало

формированию береговых линий.

Спуск озера, вероятно, был постепенным и продолжался с 19 до 14 тыс. л.н., во время максимума последнего оледенения на Камчатке, то есть не являлся прямым следствием климатических изменений. Однако, зона аккумуляции ледника, служившего подпрудой палеоозеру, была приурочена к активному вулкану Шивелуч, о чем свидетельствует петрографический состав обломков морены. Наиболее древняя из известных обломочных лавин, разрушивших постройку вулкана, произошла примерно 16 тыс. л.н. (оценка весьма приблизительная, поскольку основана на экстраполяции дат на 5 тыс. лет моложе). По всей видимости, изменения в высоте ледовой дамбы были вызваны снижением вулканической постройки или изменением направления стока льда (Zelenin et al., 2023b).

5.4. Описание выполненных работ и полученных научных результатов

на русском языке

В ходе работ по проекту было установлено, что необходима ревизия существующих представлений о геоморфологическом строении Центральной Камчатской депрессии (ЦКД). Дистанционные, полевые и литературные данные позволили нам опубликовать геоморфологическую карту ЦКД (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24089719.v2>). Наши исследования позволили не только систематизировать, но и уточнить возраст и происхождение форм рельефа внутри ЦКД. Это не являлось основной целью проекта, но в условиях очевидной недоизученности геоморфологии региона каждая новая датировка или описанный разрез могут внести существенный вклад в понимание геоморфологических процессов в ЦКД в целом и контекста существования палеоозера в частности.

Полученные результаты позволили нам составить представление о рельефе Центральной Камчатской депрессии (ЦКД), существовавшем к началу изучаемого периода и датировать время озерной аккумуляции на разных высотных уровнях. Было установлено, что озерные бассейны существовали в ЦКД неоднократно в течение среднего-позднего плейстоцена. Древние озерные отложения были описаны в среднем течении р. Камчатки, то есть относительно высоко над порогом стока. Тенденции тектонического развития ЦКД указывают на то, что даже в периоды, для которых озерные осадки неизвестны, озерные бассейны в той или иной конфигурации сохранялись в наиболее низкой части ЦКД. Даже сейчас вдоль субширотного отрезка долины р. Камчатки расположено более 400 озер суммарной площадью около 200 кв. км (что сравнимо с такими озерами, как Селигер или Ловозеро).

Историю наиболее молодого палеоозера можно отсчитывать примерно с 30 тыс. л.н. До этого времени озерное осадконакопление захватывало высоты до 200 м над у.м., что привело к формированию «Песчаного острова». Между 40 и 25 тыс. лет водоем резко сократился, что отражается в появлении речных террас на периферии Песчаного острова. Однако в северной части ЦКД непрерывное озерное осадконакопление продолжалось как минимум с 30 тыс. л.н. – более древние осадки неизвестны, поскольку перекрыты лавами Ключевской группы вулканов. Прямое датирование аллювиальных галечников в яре Длинном не позволяет объединить в единый водоем разрезы ниже и выше него по течению, как предполагалось в работе (Ponomareva et al., 2021). Таким образом, 25 тыс. л.н. высота зеркала водоема не превышала 100 м над у.м.. Затем до примерно до 17 тыс. л. происходил подъем уровня палеоозера до 120 м, приведший к накоплению материала террасы, обнажающейся в яре Ламутской (Рыбачок). Неравномерное тектоническое прогибание ЦКД (Зеленин и др, 2024) изменяло объем озерного бассейна и препятствовало формированию береговых линий.

Спуск озера, вероятно, был постепенным и продолжался с 19 до 14 тыс. л.н., во время максимума последнего оледенения на Камчатке, то есть не являлся прямым следствием климатических изменений. Однако, зона аккумуляции ледника, служившего подпрудой палеоозеру, была расположена на активном вулкане Шивелуч, о чем свидетельствует петрографический состав обломков морены. Для этого вулкана известны крупные обломочные лавины, неоднократно разрушавшие его постройку, а грубая оценка возраста наиболее древней из известных обломочных лавин соответствует времени спуска палеоозера. По всей видимости, изменения в высоте ледовой дамбы были вызваны снижением вулканической постройки или изменением направления стока льда.

на английском языке

In the course of our work under the project, we had to make a revision of the existing data on the geomorphologic structure of the Central Kamchatka Depression (CKD). New remote sensing and field data, as well as the revision of the published materials allowed us to compile and publish a geomorphologic map of the CKD (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24089719.v2>). Our research allowed us not only to systematize, but also to clarify the age and origin of landforms within the CKD. This was not the primary goal of the project, but given the apparently understudied geomorphology of the region, each new age estimate or described section can make a significant contribution to the understanding of geomorphologic processes in the CKD in general and the context of paleolake existence in particular.

Our results have allowed us to preliminary reconstruct the topography of the Central Kamchatka Depression (CKD) that existed at the beginning of the period under study and to estimate the time of accumulation of lacustrine deposits at different altitudinal levels. Lake basins existed in the CKD repeatedly during the middle to late Pleistocene (Zelenin et al., 2022). Ancient lake sediments were described in the middle reaches of the Kamchatka River, i.e., relatively high above the flow threshold. Trends in the tectonic development of the CKD indicate that even during periods for which lake sediments are unknown, lake basins in some configuration were preserved in the lowest part of the CKD. Even now, more than 400 lakes with a total area of about 200 square kilometers are located in the lower reaches of the Kamchatka River.

The history of the youngest paleolake started about 30 ka BP. Before that time, lake sedimentation occurred at the altitudes up to 200 m a.s.l. and formed the "Sand Island" - a large sand massif between the Kamchatka and Karakova rivers. Between 40 and 25 ka, the water body shrank sharply, which is reflected in the appearance of ~25 ka old river terraces. However, in the northern part of the CKD, lacustrine sedimentation continued from at least 30 ka BP - older sediments are unknown because they are overlain by lavas of the Kliuchevskoi volcanic group. Tephrochronological dating of the alluvial gravels in the Dlinny Yar does not allow us to combine downstream and upstream segments into a single water basin, as suggested in (Ponomareva et al., 2021). Thus, at 25 ka BP, the water level in the reservoir did not exceed 100 m. Then, until about 19 – 17 ka BP, the paleolake level rose for 1.20 m, leading to the accumulation of terrace material exposed in the Lamutskaya (Rybachok) outcrop.

The draining of the lake was probably gradual and lasted from 19 to 14 ka BP, during the maximum of the last glaciation in Kamchatka, that is, it was not a direct consequence of climatic changes. However, the accumulation zone of the glacier, which served as a paleolake dam, was located on the active Shiveluch volcano, as evidenced by the petrographic composition of moraine debris. For this volcano, large debris avalanches are known to have repeatedly destroyed its edifice, and a rough estimate of the age of the oldest known debris avalanche corresponds to the time of the paleolake draining. Changes in the ice dam height may have been caused by the lowering of the volcanic edifice or by changes in the direction of ice flow.

5.5. Перечень публикаций по проекту за весь срок выполнения проекта

1. Зеленин Е., Гуринов А., Гарипова С., Захаров А. (Zelenin E., Gurinov A., Garipova S., Zakharov A.) **Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific** Journal of Maps Volume 19, Issue 1, Article 2252006 <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2252006> (2023 г.)
2. Пономарева В.В., Горбач Н.В., Зеленин Е.А., Портнягин М.В., Рогозин А.Н., Дирксен О.В. (Ponomareva V.V., Gorbach N.V., Zelenin E.A., Portnyagin M.V., Rogozin A.N., Dirksen O.V.) **Кальдера Крашенинникова (восточная Камчатка): возраст и магнитуда извержения** Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле (2024 г.)
3. Зеленин Е.А., Гуринов А.Л., Захаров А.Л., Пономарева В.В., Гарипова С.Т. (Zelenin E.A., Gurinov A.L., Zakharov A.L., Ponomareva V.V., Garipova S.T.) **Geomorphological Processes in the Central Kamchatka Depression (the Kamchatka Peninsula NE Pacific) During the Last 30 ka** Геоморфология и палеогеография том 54, № 4, с. 226–237 <https://doi.org/10.31857/S294917892304017> (2023 г.)
4. Мухаметшина Е.О., Щеклеина М.Д., Захаров А.Л. (Mukhametshina E., Shchekleina, Zaharov A.)

Изменения растительности и климата севера Центральной Камчатской депрессии в позднем голоцене Геоморфология и палеогеография (2024 г.)

5. Зеленин Е.А., Кирякова М.Н., Мухаметшина Е.О., Захаров А.Л. (*Zelenin E.A., Kiryakova M.N., Mukhametshina E.O., Zakharov A.L.*) **Морфология долины реки Камчатки как отражение эндогенных процессов активной континентальной окраины** Геоморфология и палеогеография (2024 г.)

6. Зеленин Е.А., Пономарева В.В., Федоров Г.Б., Гуринов А.Л., Захаров А.Л., Дирксен О.В., Мухаметшина Е.О., Портнягин М.В. (*Zelenin E.A., Ponomareva V.V., Fedorov G.B., Gurinov A.L., Zakharov A.L., Dirksen O.V., Mukhametshina E.O., Portnyagin M.V.*) **Giant Late Pleistocene paleolake in Central Kamchatka depression (Kamchatka Peninsula, Russian Far East)** Limnology and Freshwater Biology №4, с. 1623-1624 <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1623> (2022 г.)

7. Мухаметшина Е.О., Зеленин Е.А., Пендеа И.Ф. (*Mukhametshina E.O., Zelenin E.A., Pendea I.F.*) **Paleoclimatic conditions of a Late Pleistocene mega-lake in Kamchatka** Limnology and Freshwater Biology №4, с. 1506-1508 <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1506> (2022 г.)

Приложение 2. Список литературы

1. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И. С., Лупикина Е.Г. Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки. М.: Наука, 1968. 245 с.
2. Зеленин Е.А., Кирякова М.Н., Мухаметшина Е.О., Захаров А.Л. Морфология долины реки Камчатки как отклик флювиальных систем на эндогенные процессы активной континентальной окраины. Геоморфология и палеогеография. 2024. In Publ.
3. Зеленин Е.А., Пономарева В.В., Портнягин М.В. и др. Палеозера Центральной Камчатской депрессии в среднем и позднем плейстоцене. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 30-31 марта 2022 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2022. С. 99-102.
4. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. Продольные сдвиги в островной дуге при нормальном поддвиге океанической плиты: пример Камчатки // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 5. С. 92-104. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-5-92-104>
5. Куликовский М.С., Глущенко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с
6. Мелекесцев И.В. Брайцева О.А., Эрлих Э.Н. и др. Камчатка. Курильские и Командорские острова. М.: Наука, 1974. 437 с.
7. Мухаметшина Е.О., Зеленин Е. А., Пендеа И.Ф. Реконструкция позднеледниковых обстановок экзогенного рельефообразования центральной Камчатки по данным спорово-пыльцевого анализа // Геоморфология. 2021. т. 52. Вып. 4. С.53–63
8. Пономарева В.В., Горбач Н.В., Зеленин Е.А., 2014, Новые данные о крупномасштабных обрушениях постройки вулкана Шивелуч // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 109-114
9. Федченко Б. А. Биология водных растений, как предмет изучения в школе. М.: Гос. изд-во, 1925. 132 с.

10. Barr I.D., Solomina O. Pleistocene and Holocene glacier fluctuations upon the Kamchatka peninsula // *Global and Planetary Changes*. 2014. Vol. 113. P. 110–120.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.005>
11. Blaauw, M., Christen, J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process Bayesian
12. Bonali F.L., Tibaldi A., Marchese F. et al. UAV-based surveying in volcano-tectonics: An example from the Iceland rift // *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 121. P. 46-64. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.02.004>.
13. Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates // *Radiocarbon*. 2009. Vol 51. № 1. P. 337–360. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
14. Derkachev A.N., Gorbarenko S.A., Ponomareva V.V. et al. Middle to late Pleistocene record of explosive volcanic eruptions in marine sediments offshore Kamchatka (Meiji Rise, NW Pacific). *Journal of Quaternary Science*. 2020. Vol. 35. Is. 1-2. P. 362-379.
<https://doi.org/10.1002/jqs.3175>.
15. Derkachev A.N., Nikolaeva N.A., Gorbarenko S.A. et al. Tephra layers of in the quaternary deposits of the Sea of Okhotsk: distribution, composition, age and volcanic sources // *Quat. Int.* 2016. Vol. 425. P. 248-272.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.004>.
16. Derkachev A.N., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V. et al. Widespread tephra layers in the Bering Sea sediments: distal clues to large explosive eruptions from the Aleutian volcanic arc. *Bull Volcanol.* 2018. Vol. 80, Art. № 80. <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1254-9>
17. Derkachev A.N., Gorbarenko S. A, Portnyagin M. et al. Tephrostratigraphy of Pleistocene-Holocene deposits from the Detroit Rise eastern slope (northwestern Pacific) // *Front. Earth Sci.* 2023. Vol. 10-2022. P. 1-16.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.971404>
18. Grimm E.C. TILIA and TILIA GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data // *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods // Newsletter*. 1990. № 4. P. 5-7

19. Kozhurin A., Zelenin E. An extending island arc: the case of Kamchatka // Tectonophysics. 2017. Vol. 706. P. 91– 102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.001>
20. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1 Teil: Naviculaceae. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p
21. Lange-Bertalot, Horst and K. Krammer. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. 1988. 289 c.
22. Lowe, D. J.: Tephrochronology and its application: A review // Quat. Geochronol. 2011. Vol. 6. P. 107–153.
23. McCalpin J.P. Paleoseismology. 2nd Edition. Amsterdam-London: Academic Press, 2009. 615 p.
24. Moore P.D., Webb J.A., Collison M.E. Pollen Analysis. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1991. 216 p.
25. Pendea I.F., Ponomareva V., Bourgeois J. et al. Late Glacial to Holocene paleoenvironmental change on the northwestern Pacific seaboard, Kamchatka Peninsula (Russia) // Quaternary Science Reviews. 2017. Vol. 157. P. 14-28.
26. [Ponomareva V. V.](#), [Portnyagin M. V.](#), [Bubenshchikova N. V. et al.](#) A 6.2 Ma-Long Record of Major Explosive Eruptions From the NW Pacific Volcanic Arcs Based on the Offshore Tephra Sequences on the Northern Tip of the Emperor Seamount Chain // [Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2023.](#) Vol. 24. Is. 12. [P. e2023GC011126.](#) <https://doi.org/10.1029/2023GC011126>
27. Ponomareva V., Pendea I.F., Zelenin E. et al. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications// Quaternary Science Reviews. 2021. Article 106838.
28. Ponomareva V., Polyak L., Portnyagin M. et al. Holocene tephra from the Chukchi-Alaskan margin, Arctic Ocean: Implications for sediment chronostratigraphy and volcanic history // Quaternary Geochronology. 2018. Vol. 45. P. 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2017.11.001>
29. Ponomareva V., Portnyagin M., Derkachev A. et al. Early Holocene M~ 6 explosive eruption from Plosky volcanic massif (Kamchatka) and its tephra as a link between terrestrial and marine paleoenvironmental records // International Journal of Earth

Sciences. 2013a. Vol. 102. № 6. P.1673–1699. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0898-0>

30. Ponomareva V., Portnyagin M., Derkachev A. et al. Identification of a widespread Kamchatkan tephra: a middle Pleistocene tie-point between Arctic and Pacific paleoclimatic records // *Geophysical Research Letters*. 2013b. Vol. 40. №. 14. P. 3538-3543. <https://doi.org/10.1002/grl.50645>
31. Ponomareva V., Portnyagin M., Pendea I.F. et al. A full holocene tephrochronology for the Kamchatsky Peninsula region: Applications from Kamchatka to North America // *Quat.Sci.Rev.* 2017. Vol. 168. P. 101-122. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.031>
32. Ponomareva V.V., Churikova T., Melekestsev I.V. et al. Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific Region // *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, American Geophysical Union Geophysical Monograph*. 2007. Series 172. P. 165–198
33. Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. P. 469–486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>.
34. Rawson H., Pyle D.M., Mather T.A. et al. The magmatic and eruptive response of arc volcanoes to deglaciation: Insights from southern Chile. 2016. Vol. 44. № 4. P. 251-254.
35. Stockmarr J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis // *Pollen et spores*. 1971. Vol. 13. P. 614-621
36. van den Bogaard C., Jensen B. J. L., Pearce N. J. G. et al. Volcanic ash layers in Lake El'gygytgyn: eight new regionally significant chronostratigraphic markers for western Beringia // *Climate of the Past*. 2014. Vol. 10. № 10. P. 1041–1062.
37. Watt S.F.L., Pyle D.M., Mather T.A. The volcanic response to deglaciation: evidence from glaciated arcs and a reassessment of global eruption records // *Earth Sci. Rev.* 2013. Vol. 122. P. 77-102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.007>.
38. Zelenin E., Gurinov A., Garipova S. et al. Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific // *Journal of maps*. 2023a. Vol. 19. № 1. P. 1-10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2252006>

39. Zelenin E.A., Gurinov A. L., Zakharov A. L. et al. Geomorphological processes in the Central Kamchatka Depression (The Kamchatka Peninsula, NE Pacific) during the last 30 Ka. *Geomorfologiya i paleogeografiya*. 2023b. Vol. 54. № 4. P. 226-237.

<https://doi.org/10.31857/S2949178923040175>