

## Отчет о выполнении проекта

№ 21-77-10102

### «История развития и деградации гигантского позднеплейстоценового озера на Камчатке»,

в период с 1 июля 2021 г. по 30 июня 2022 г.

**Номер регистрации сведений о начинаемой научно-исследовательской работе в единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения (rosrid.ru):**

121121600127-0

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

Июль-сентябрь: подбор, привязка и оцифровка опубликованных материалов, геоморфологическое дешифрирование дистанционных данных с акцентом на поиск уровней стояния озера и наиболее доступных для полевых работ обнажений.

Сентябрь-октябрь: полевые работы на Камчатке – контроль результатов дешифрирования, поиск перспективных разрезов, ревизия известных и бурение. Отбор образцов из найденных разрезов озерных отложений. Геодезическая и геоморфологическая привязка опорных разрезов.

Октябрь-февраль: пробоподготовка и анализ гранулометрических и спорово-пыльцевых образцов (ИГ РАН, г. Москва), интерпретация, пробоподготовка и часть геохимических исследований образцов тефры (ГЕОХИ РАН, г. Москва), микронзондовый и LA-ICP-MS анализ образцов тефры (ГЕОМАР, г. Киль, Германия) – требуется командировка в г. Киль (Германия) для Пономаревой (в случае эпидемиологических ограничений на заграничные командировки анализ образцов тефры будет проведен немецкими коллегами – см. п. 1.11).

Февраль-июнь: обобщение первичных результатов, разработка легенды и создание первичной геоморфологической карты ЦКД, геоморфологическое дешифрирование дистанционных данных с установлением возможных долин стока вод палеоозера, представление первых результатов исследований по проекту на международных и всероссийских конференциях, разработка программы полевых работ отчетного года 2022-2023.

В связи с постоянными изменениями в сроках и формате проведения конференций, мы не можем предложить однозначную программу докладов. Наиболее вероятны доклады на AGU Fall meeting (г. Сан-Франциско, США, онлайн-участие), EGU General Assembly (г. Вена, Австрия, онлайн-участие), Международном совещании по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг JKASP-11 (г. Кагосима, Япония, очное участие), а также на всероссийской конференции «Пути эволюционной географии» и 53 Тектоническом совещании.

#### **1.2. Заявленные научные результаты на конец отчетного периода**

К концу первого года исследований будут получены следующие результаты:

1) на основании дешифрирования и интерпретации дистанционных данных будет составлена предварительная геоморфологическая карта ЦКД. Основной нагрузкой карты станут выраженные в рельефе палеобереговые линии, ледовые и наиболее сохранные (морена последнего ледникового максимума?) поля холмисто-западинного рельефа, формы флювиального и пролювиального рельефа (среди которых будут выделены не соответствующие современной интенсивности этих процессов), будет уточнено, относительно опубликованных нами ранее, положение активных разломов (Kozhurin, Zelenin 2017) и распространение вулканогенных отложений (Ponomareva et al., 2013a, 2015, 2017)

в районе современного стока р. Камчатка.

- 2) Будут проведены полевые работы в Центральной Камчатской депрессии с отбором образцов тефры для аналитических исследований, а также озерных осадков на радиоуглеродное датирование, литологический и спорово-пыльцевой анализы; будет начата лабораторная обработка образцов.
- 3) Будет подготовлена статья по возрастной модели и пыльцевым спектрам опорного разреза озерных отложений на берегу Ключевского озера (район пос. Ключи).

### 1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период

План работ по проекту в отчетный период включал в себя:

1. разработку модели и наполнение рабочей геоинформационной системы (ГИС),
2. обработку и дешифрирование дистанционных данных,
3. полевые работы на осадочных разрезах днища Центральной камчатской депрессии (ЦКД),
4. пробоподготовку и аналитические исследования тефры,
5. комплекс аналитических исследований осадка,
6. представление результатов

Фактически выполненные работы в соответствии с этим планом заключались в следующем:

1. Была создана ГИС для обмена пространственными данными по проекту 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](https://git-codecommit.eu-north-1.amazonaws.com/v1/repos/GIS_Paleolake)). Визуализация и структура ГИС приведены на рис. 1 и 2 (Приложение).

2. Была создана схема дешифрирования и геоморфологическая карта (рис. 3, приложение) днища Центральной камчатской депрессии (ЦКД) по морфогенетическому принципу. 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.

3. В пределах предполагаемого озера проведены полевые работы, направленные на изучение донных фаций озерных отложений. Описаны и разрезы в верхнем течении р. Камчатка и в долинах левых притоков Камчатки – рек Быстрая, Андриановка, Ветловая (рис. 4, приложение).

Из обнажения Андриановка был выполнен отбор образцов на спорово-пыльцевой, диатомовый и гранулометрический анализ, для чего выполнены ступенчатые расчистки и шурф в нижней части (рис. 5, приложение). Пробоотбор осуществлялся через каждые 10-20 см в зависимости от гранулометрического состава отложений.

Повторно описан разрез Ключевского озера - проведено дополнительное опробование разреза на диатомовый, спорово-пыльцевой и гранулометрический анализы, а также отобраны образцы тефры для контроля стратиграфического положения образцов и их привязки к полученной нами ранее возрастной модели (Popomareva, Pendea, Zelenin et al., 2021). Опробование восьмиметровой толщи осадков, вскрытых в разрезе, выполнено с шагом 5-10 см (на отдельных глубинах до 20-35см), всего более 80 проб.

Помимо названных объектов в пределах ЦКД, полевые тефрохронологические исследования проводились в прилегающих районах, которые в исследуемый период времени предположительно были заняты ледниками или отделены от ЦКД горными хребтами. Наиболее информативные разрезы были описаны в районе Ажабачьего озера (хр. Кумроч) и вблизи г. Петропавловска-Камчатского (пос. Николаевка). Единичная линза озерных отложений, содержащих пеплы, также была описана нашими коллегами в среднем течении р. Озерной (северное обрамление ЦКД). Из изученных разрезов было отобрано около 200 образцов тефры. Построены индивидуальные разрезы тефры, а также сводные разрезы для близких обнажений, между которыми была возможность проводить полевые корреляции на основе непосредственного прослеживания горизонтов тефры. Эти разрезы явились предварительной стратиграфической канвой для последующих геохимических корреляций.

4. Была проведена подготовка около 150 образцов тефры для геохимических анализов. Пробоподготовка включала мытье образцов в дистиллированной воде, высушивание, изучение под микроскопом, подготовку шашек для геохимического анализа и их фотодокументацию (рис. 6, приложение).

Геохимические исследования единичных частиц стёкол из тефры с определением содержания главных и рассеянных элементов проводились с использованием электронного микрозонда и масс-спектрометрии индукционно-связанной плазмы с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) в Гельмгольц Центре исследования океана ГЕОМАР и Университете г. Киль (Германия). В отчётном году получено около 2000 микрозондовых анализов по 85 образцам тефры. Затем с помощью LA-ICP-MS было получено 254 анализа содержания рассеянных элементов в стёклах из 28 образцов.

Был проведен предварительный 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, а также пеплов из отложений оз. Эльгыгытгын, Чукотка (Рис. 7, приложение).

Молодые пирокластические породы Камчатки редко содержат циркон, калиевые полевые шпаты или биотит, необходимые для (U-Th)/He или  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методов. Поэтому для определения возраста пеплов за пределами возможностей радиоуглеродного метода (40-50 тыс. лет) мы использовали корреляции пеплов с их удаленными аналогами в датированных морских и наземных колонках. 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 возрастны привязки всех разрезов, содержащих этот пепел.

5. Начат гранулометрический и диатомовый анализ отложений опорных разрезов Ключевского озера и Андриановка (образцы были отправлены с Камчатки в сентябре и доставлены почтой России в конце февраля). Образцы для спорово-пыльцевого анализа уже обработаны, проанализированы, а первичные результаты представлены в п. 1.4 отчета.

Лабораторная подготовка образцов для пыльцевого анализа из разреза Камплен проводилась на базе лаборатории университета Лэйкхед (Канада) 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 (Stokmarr, 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 плингиацала 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.

6. Полученные результаты частично были представлены на XXIV ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога – крупнейшем совещании специалистов по геоморфологии и четвертичной стратиграфии Камчатки, темы докладов «Палеозера 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.). Фитоклиматические реконструкции по результатам спорово-пыльцевого будут представлены Е.О. Мухаметшиной на XV Всероссийской палинологической конференции «Актуальные проблемы современной палинологии» (1-3 июня 2022 г.). По первичным результатам геоморфологического дешифрирования и спорово-пыльцевого анализа подготовлены тезисы на 5 Международную конференцию «Палеолимнология северной

Евразии». Подготовлена рукопись статьи по возрастной модели и пыльцевым спектрам опорного разреза озерных отложений на берегу Ключевского озера (район пос. Ключи) для подачи в журнал *Quaternary Science Reviews* (Q1). Подготовлены таблицы и базы геохимических данных для статьи с обоснованием среднеплейстоценового возраста самых древних из обнажающихся в пределах ЦКД озерных отложений (пачки "синих глин").

**Все планируемые в отчетный период работы выполнены полностью:**

да

#### **1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде**

##### **I. Геоинформационное картографирование.**

Была создана геоинформационная система для обмена пространственными данными по проекту между исполнителями. На основании дистанционных данных и ранее полученных полевых материалов, составивших научный задел заявки, была составлена геоморфологическая карта (рис. 3) днища Центральной камчатской депрессии (ЦКД). В пределах карты выделены следующие генетические комплексы рельефа:

- Пойма р. Камчатка и крупнейших притоков на большей части ЦКД выделена по поясу свободного меандрирования русла. Ширина пояса местами достигает 5-7 км, однако есть участки распространения врезанных меандров. На субширотном участке долины пояс меандрирования переходит в широкую (около 15 км) заболоченную аллювиальную (озерно-аллювиальную) равнину, прорезанную системой проток и частично занятую акваторией неглубоких (реликтовых?) озер.
- Аллювиально-пролювиальные конусы выноса характерны для большинства притоков р. Камчатка. Пологонаклонные и наклонные в сторону поверхности. Крутизна  $\sim 5-15^\circ$  плавно увеличивается в направлении к коренным бортам впадины. Занимают окраинные части впадины, располагаясь непосредственно у коренных склонов. Сливаясь, поверхности отдельных конусов образуют единую наклонную аллювиально-пролювиальную аккумулятивную равнину. Поверхность конусов выпуклая, пересечена системой сухих ложбин; русла притоков реки Камчатки фуркируют на конусах, разбиваются на рукава и/или отклоняются от прямолинейного направления течения, что вызвано ускоренными темпами аккумуляции материала на выходе долин из горной части. Наиболее молодые генерации конусов опираются на уровень поймы, и поэтому глубоко врезаны в более древние генерации пролювиальных отложений. Отдельно выделены вулканогенные конуса выноса, приуроченные к современным вулканическим постройкам и отличающиеся более высокими темпами аккумуляции за счет постоянного поступления пирокластического материала.
- Флювиальные террасы начинают явно прослеживаться в строении долинного комплекса начиная примерно от устья р. Андриановки (от Мильково). Выше по течению террасы не выделяются по материалам ДЗЗ - река зажата с обеих сторон конусами выноса долин-притоков, которые возможно перекрывают террасовые уровни. Местами террасы не прислонены к бортам долины, а образуют отдельные останцы, обособленные окруженных современным руслом р. Камчатки и ее притоками. Высоты террас находятся в диапазоне 10-15 м до  $\sim 50$  м над современным урезом.
- Очень низкая реликтовая озерно-аллювиальная равнина/терраса (?) выделена в отдельный генетический тип, поскольку она морфологически отличается как от нормальных флювиальных террас по своей высоте и отсутствию приуроченности к оси долины, так и от поймы - практически отсутствуют яркие формы флювиальной (пойменно-русловой) аккумуляции, брошенные излучины, характерные для современной поймы. Поверхность, вероятно, частично или полностью затапливается речными водами во время половодья и сильных паводков, но при этом, судя по морфологии, современные флювиальные процессы (эрозия, равно как и аккумуляция) не играли и не играют существенной роли в формировании ее внешнего облика и микро/мезорельефа. Этот комплекс распространен характерен для субширотного участка долины р. Камчатка, а также для долин правых притоков р. Камчатка в ее среднем течении - р. Китильгина и р. Урц. Требуется дальнейшие полевые работы для уточнения генезиса.
- Древние озерно-ледниковые террасы - прослеживаются на абсолютных высотах 220-250 м над у.м. Поверхность разделена долинами рек на несколько крупных фрагментов и занимает значительную площадь в средней части бассейна Камчатки. Судя по геоморфологическому положению, строению (в строении толщи, слагающей массивы преобладают слоистые песчаные отложения) и плановым очертаниям, эта поверхность представляет собой длительно

существовавшую внутреннюю дельту, которая формировалась в условиях увеличенных темпов транзита и аккумуляции наносов. Вероятно, аккумуляция происходила в субаквальных условиях водоема, занимавшего практически все пространство днища впадины. На поверхности массивов множественные следы эоловой трансформации: дефляционные котловины, дюны, линейно-вытянутые гряды эоловой денудации и т.п. Поверхность и склоны песчаных массивов пересекает разветвленная система ныне сухих малых эрозионных форм. Требуется более детальное геоморфологическое картографирование и полевые работы, направленные на датирование этих форм и слагающих их отложений. Работы по этому направлению начаты в отчетный период (разрез Андриановка).

- Конечно-моренные комплексы (КМК) характерны для левых притоков Камчатки - долин, которые начинаются в центральных частях Срединного хребта. Редко – для хр. Валагинского и хр. Кумроч. В отдельных случаях КМК выдвигаются во впадину, образуя амфитеатры. Размер КМК, а также абсолютные высоты, на которых расположены моренные образования, наиболее удаленные от осевой части Срединного хребта, изменяются в зависимости от физико-географических условий: при движении с ЮЮЗ на ССВ размер КМК становится больше, а абсолютные высоты – меньше (от ~ 400м в долине Правой Камчатки до ~200м в долине р. Киревна). На размер КМК существенно влияние оказывает и площадь водосбора реки, в долине которой он формировался: наиболее крупные КМК соответствуют долинам с большим по площади горным водосбором, что характерно для оледенения горно-долинного типа). Перепад высот в пределах КМК может быть значительным – до нескольких десятков метров; характерно множество западин, занятых небольшими озерами, а также линейно и/или дугообразно вытянутые гряды. Свежесть большинства форм свидетельствует об их относительной молодости (LGM). Моренный хаотичный рельеф в северо-восточной части впадины – у юго-восточных склонов Шивелуча и по периметру вокруг вулкана свидетельствует о том, что в вулкан был независимым центром оледенения, которое на этапе максимального своего развития могло блокировать сток по долине р. Камчатки (абсолютные высоты КМК ~ 30-40м).

По всей видимости, озерных этапов в истории развития впадины было несколько, на что указывает наличие высоких террас – массивов озерной аккумуляции, занимающих значительную часть днища впадины в ее осевой части и расположенных существенно выше (220-250м), чем изученные нами ранее разрезы этапа 30-10 тыс. л.н. (до 160м).

## II. Фитоклиматические реконструкции.

Разрез Ключевского озера был опробован с шагом 5-10 см (на отдельных глубинах до 20-35см), всего получено более 80 проб. Подготовленный материал является уникальным по полноте и детальности возрастной привязки (Ponomareva, Pendea, Zelenin 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 pumila*), 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. Произрастать 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 палеозера 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 сопровождало 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 субэаральных 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 (Мухаметшина Зеленин, Пендеа, 2021).

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 см<sup>3</sup>, 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 *Tara natans*) 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.

### III. Тефрохронологические исследования.

Установлено, что изученные пеплы из озёрных отложений связаны с извержениями в пределах всех вулканических районов Камчатки: Восточного фронта, тыловой зоны Восточного вулканического пояса, ЦКД и Срединного хребта. Такое разнообразие составов облегчает идентификацию и корреляцию вновь описанных пеплов с ранее датированными.

Тефрохронологические исследования впервые обеспечили датировками пачки озёрных отложений разных возрастных этапов среднего-позднего плейстоцена. Отложения интересующего нас самого молодого этапа (12-30 тыс. л. н.) ранее были описаны во многих обнажениях в западной части Ключевской группы вулканов, где они залегают на лавах ареальной зоны, наложенной на в. Ушковский. В отчетном периоде в ЦКД отложения этого этапа были обнаружены в верхнем течении р. Камчатка и в долине р. Китильгиной, а за пределами ее – в районе оз. Ажабачьего (нижнее течение р. Камчатка) и в среднем течении р. Озерной. Оценка возраста отложений в разрозненных разрезах проводилась с помощью сопоставления вновь описанных и ранее изученных нами маркирующих пеплов (Ponomareva et al., 2021).

Уникальной находкой оказался разрез оз. Ажабачьего в бассейне нижнего течения р. Камчатка – современного стока ЦКД. Отложения мощностью около 10 м, вмещающие 51 горизонт тефры, накапливались здесь на протяжении не менее 50 тыс. лет: пеплы верхней части разреза хорошо сопоставляются с датированными нами пеплами ключевого разреза КамПлен, а ниже пепла Gog28 обнаружен пепел T0, идентифицированный в осадках оз. Эльгыгытгын и датированный 58 тыс. л.н. (Nowaczyk et al., 2013). Это первая находка пепла T0 на Камчатке, подтверждающая его камчатское, а не алеутско-аляскинское происхождение (van den Bogaard et al., 2014). Этот разрез требует дальнейшего изучения, поскольку к настоящему времени он является единственным известным палеоархивом природной среды на Камчатке, захватывающим время возникновения озера в ЦКД ~30 тыс. л.н.

Озёрные отложения в долинах рек Андриановка и Ветловая, а также в районе пос. Николаевка вблизи г. Петропавловска-Камчатского, скорее всего, формировались в течение длительного периода времени между 25 и 180 тыс. лет. В верхней части этих разрезов обнаружена тефра EVF-2 с возрастом 25.8 тыс. лет (Ponomareva et al., 2021), ниже выявлен еще ряд общих для этих разрезов пеплов, а в основании разреза на Андриановке залегает т.н. тефра Раучуа (ок. 177 тыс. лет) (Ponomareva et al., 2013). Эта тефра ранее была идентифицирована нами на побережье Северного Ледовитого океана и в осадках оз. Эльгыгытгын и датирована на основании возрастной модели для последних. В этом году мы впервые смогли найти эту тефру на Камчатке, что подтверждает ее камчатское, а не аляскинско-алеутское происхождение.

Впервые получены надежные датировки для так называемых "синих глин" (Кушев, Ливеровский, 1940; Брайцева и др., 1968, 2005; Куприна, 1970; Певзнер и др., 2019). Эта пачка уверенно прослеживается в обнажениях среднего течения р. Камчатка на протяжении ~30 км. Несмотря на то, что эта пачка впервые была описана еще в 1940 г., оценки её возраста у разных авторов до сих пор весьма разнородны и варьируют от раннего до позднего плейстоцена. Нами были геохимически скоррелированы горизонты тефры, захороненные в пачке "синих глин", и пеплы из осадочных колонок Охотского моря и Тихого океана, для которых опубликованы возрастные модели. Это позволило сделать вывод, что эти отложения сформировались примерно 300-320 тыс. лет назад. В пачке "синих глин" залегают тефры, связанные с извержениями в пределах вулканических центров Южной (Горелый, Паужетка) и Восточной Камчатки, а также с извержениями вулканов Срединного хребта (в частности, вулкана Хангар).

Таким образом, в результате первого года работ удалось датировать озёрные отложения, обнажающиеся в различных частях ЦКД и ее обрамления, и установить, что в пределах ЦКД неоднократно формировались долгоживущие крупные озёра, а также выделить отложения, относящиеся к этапу озерного осадконакопления 12-30 тыс. л.н.

**Все запланированные в отчетном периоде научные результаты достигнуты:**

да

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

### ***на русском языке***

За первый год работы по проекту «История развития и деградации гигантского позднеплейстоценового озера на Камчатке» выполнен ряд дистанционных и полевых работ. Была создана схема дешифрирования и геоморфологическая карта дна Центральной камчатской депрессии (ЦКД). В пределах предполагаемого озера проведены полевые работы, направленные на изучение донных фаций озерных отложений. Описаны и разрезы в верхнем течении р. Камчатка и в долинах левых притоков Камчатки – рек Быстрая, Андриановка, Ветловая. Начат гранулометрический и диатомовый анализ отложений опорных разрезов Ключевского озера и Андриановка. Образцы для спорово-пыльцевого анализа уже обработаны, проанализированы, а первичные результаты готовятся к публикации.

Разрез Ключевского озера был опробован с шагом 5-10 см (на отдельных глубинах до 20-35см), всего получено более 80 проб для спорово-пыльцевого анализа. Подготовленный материал является уникальным по полноте и детальности возрастной привязки (Ponomareva, Pendea, Zelenin 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.).

Полученные результаты показывают, что изменения фитоклиматических условий на рубеже плейстоцена и голоцена на Камчатке происходили очень стремительно, и это выразилось в резкой смене характера растительности и соответствующих ей спорово-пыльцевых спектров. Это же подтверждается и другими исследователями Камчатки [Pendea et al., 2017; Брайцева и др., 1968; Мухаметшина и др., 2021]. При этом изменения спорово-пыльцевых спектров 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. 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.

Уникальной находкой оказался разрез оз. Ажабачьего в бассейне нижнего течения р. Камчатка – современного стока ЦКД. Отложения мощностью около 10 м, вмещающие 51 горизонт тефры, накапливались здесь на протяжении не менее 50 тыс. лет: пеплы верхней части разреза хорошо сопоставляются с датированными нами пеплами ключевого разреза Ключевского озера, а ниже пепла Gog28 обнаружен пепел T0, идентифицированный в осадках оз. Эльгыгытгын и датированный 58 тыс. л.н. (Nowaczyk et al., 2013). Это первая находка пепла T0 на Камчатке, подтверждающая его камчатское, а не алеутско-аляскинское происхождение (van den Bogaard et al., 2014). Этот разрез требует дальнейшего изучения, поскольку к настоящему времени он является единственным известным палеоархивом природной среды на Камчатке, захватывающим время возникновения озера в ЦКД ~30 тыс. л.н.

Плейстоценовые озёрные отложения в Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) описывались многими авторами, начиная с 1940 г, однако возраст отдельных пачек этих отложений оставался предметом дискуссий. Накапливавшиеся в течение длительных интервалов времени озёрные отложения содержат горизонты вулканических пеплов. Эти тефры никогда ранее систематически не изучались за исключением нескольких горизонтов в озёрных отложениях р. Пахчи и одного пепла из яра Половинка, для которых еще в начале 1980-ых гг. было сделано минералогическое описание и получены валовые химические анализы. Вулканы-источники описанных пеплов установлены не были. Однако даже за пределами возможностей радиоуглеродного метода корреляции пеплов с их удаленными аналогами в датированных морских и наземных колонках могут быть использованы для определения возраста отложений. 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.

В пределах ЦКД нам впервые удалось надежно датировать озёрные отложения этапов 320-300 и 180-30 тыс. л.н. Эти датировки и распространение отложений доказывают, что депрессия неоднократно в течение плейстоцена заполнялась долгоживущими крупными озёрами.

#### ***на английском языке***

During the first year of work on the project "History of development and degradation of a giant Late Pleistocene lake in Kamchatka" a number of remote and field works were performed. A scheme of interpretation and a geomorphological map of the bottom of the Central Kamchatka Depression (CKD) were created. The field works aimed at the study of the bottom facies of lacustrine deposits were carried out within the limits of the supposed lake. The sections in the upper reaches of the Kamchatka River and in the valleys of the left tributaries of Kamchatka, Bystraya, Andrianovka, and Vetlovaya rivers, were also described. Grain size and diatom analysis of sediments from reference sections of Kliuchevskoe Lake and Andrianovka was started. Samples for spore-pollen analysis have already been processed and analyzed, and primary results are being prepared for publication.

The Kliuchevskoi Lake section was sampled at 5-10 cm increments (at some depths up to 20–35 cm). More than 80 samples for spore-pollen analysis were obtained in total. The prepared material is unique in its completeness and age detail (Ponomareva, Pendea, Zelenin et al., 2021) as an archive of paleoclimatic conditions in the CKD for the last 28 thousand years. According to the results of the spore-pollen analysis, 8 local pollen zones were identified, reflecting the main stages of vegetation changes in the CKD in the interval between 28.4 and 7.9 thousand calibrated years ago (ka BP).

The results show that phytoclimatic conditions at the Pleistocene-Holocene boundary on Kamchatka were changing very rapidly, and this was expressed in a dramatic change of vegetation patterns and corresponding pollen spectra. This is also confirmed by other researchers of Kamchatka (Pendea et al., 2017; Braitseva et al., 1968; Mukhametshina et al., 2021). At the same time, the pollen spectra changes during the transition from MIS3 to MIS2 were smoother. Apparently, the climate



changed relatively slowly during the transition from the Late Pleistocene interstadial to the last glacial maximum. It is important to note the presence of pollen of aquatic plants in the section. In this case, no pollen of thermophilic aquatic plants was found in sediments younger than 25.3 ka BP, and in sediments younger than 11.6 ka BP, no pollen of aquatic plants was found.

The section of Lake Azhabachy in the basin of the lower reaches of the Kamchatka River, the modern flow of the CKD, was a unique find. The sediments of about 10 m thick and containing 51 tephra layers accumulated here for at least 50 thousand years: tephra from the upper part of the section correlates well with our dated ashes from the Kliuchevskoe Lake key section, and below the Gor28 tephra we found T0 tephra identified in the sediments of Elgygytgyn Lake and dated to 58 ka BP (Nowaczyk et al., 2013). This is the first find of T0 tephra in Kamchatka, confirming its Kamchatka rather than Aleutian-Alaska origin (van den Bogaard et al., 2014). This transect requires further study because, to date, it is the only known paleoarchive of the natural environment in Kamchatka, spanning the time of lake origin in the CKD (~30 thousand BP).

Pleistocene lake sediments in the Central Kamchatka Depression (CKD) have been described by many authors since 1940, but their age has remained a matter of debate. The lake sediments accumulated over long time intervals contain tephra layers. These tephras have never been systematically studied before except for several horizons in the lake sediments of the Pakhcha River and one tephra from the Polovinka site, for which mineralogical descriptions and bulk chemical analyses were made as early as in the early 1980s. The source volcanoes of the described tephra have not been identified. However, even beyond the capabilities of the radiocarbon method, tephra correlations with their distant facies in dated marine and terrestrial sediments can be used to determine the age of deposits. The greater the number of sections that contain any tephra, the greater the number of dates or estimates from age models can be obtained for this tephra, and the more accurate will be the age correlations of all sections containing this tephra.

For the first time, we were able to reliably date lake deposits of the stages 320–300 and 180–30 thousand BP within the CKD. These dates and distribution of deposits prove that the depression was repeatedly filled with long-lived large lakes.

## Приложение

Иллюстрации к промежуточному отчету по гранту РФ 21-77-10102 «История развития и деградации гигантского позднплейстоценового озера на Камчатке» за 2021-2022гг.

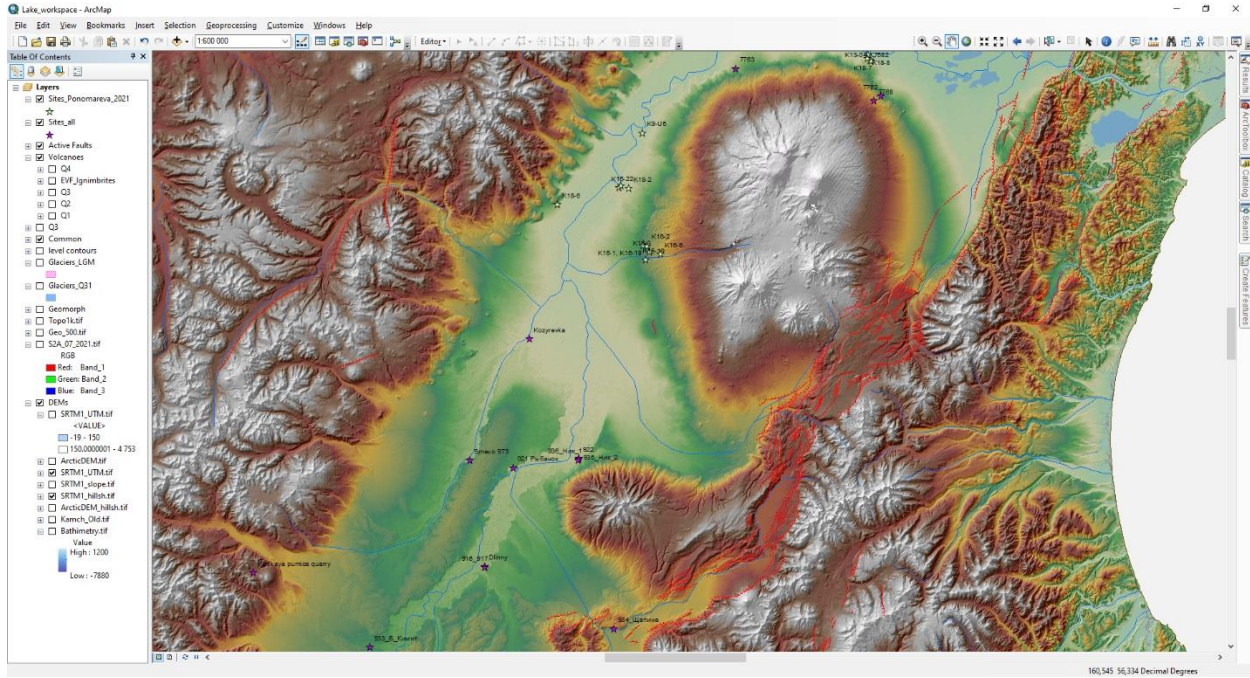


Рис.1. Визуализация рабочей ГИС в ПО ArcGIS.

структура ГИС				
Группа	Группа	Слой	Содержание	Ссылка
		Sites_Ponomareva_2021	Позднеплейстоценовые разрезы озерных, скоррелированные тефрой	Ponomareva et al., 2021
		Sites_all	все разрезы из папки Points	не опубликовано
		Active Faults	Активные в позднем плейстоцене разломы, штрихи в сторону опущенного крыла	Kozhurin, Zelenin, 2017
Volcanoes	Q4		Четвертичные центры извержений и вулканические отложения по возрастам	ГИС Голоценовый вулканизм Камчатки
			детальная бд голоценового вулканизма	
		Volcanic_Centers	вулканические центры	
		Vents	конкретные центры извержений	
			области распространения вулканических отложений с возрастом и генетическим типом	
		deposits		
	Q3		поздний плейстоцен	неопубликованные схемы Мелекесцева
		V_Q3_C	центры извержений	
		V_Q3_P	области распространения вулканических отложений	
	Q2		средний плейстоцен	
	V_Q2_C	центры извержений		
	V_Q2_P	области распространения вулканических отложений		
Q1		ранний плейстоцен		
	V_Q1_C	центры извержений		
	V_Q1_P	области распространения вулканических отложений		
		V_Q1_S	щитовые вулканы	
	Common		общегеографическая нагрузка	OpenStreetMaps
		Landmass	береговая линия	
		places	населенные пункты	
		roads	автомобильные дороги, просеки, тропы	
		waterways	детальные водотоки - реки и ручьи	
		water_a	детальные водоемы	
		river	генерализованные водотоки - реки и ручьи	
		lakes	генерализованные водоемы	
		level contours	горизонтالي 160, 320 и 480 м	ЦМР SRTM1
		Glaciers_LGM	границы оледенения 2 фазы позднеплейстоценового оледенения	Мелекесцев, 1974
		Glaciers_Q31	границы оледенения 1 фазы позднеплейстоценового оледенения	Мелекесцев, 1974
		Geomorph	геоморфологическая схема ЦКД 1962г	не опубликовано
		Топо100k.tif	топографическая карта М1:100 000	
		Geo_500.tif	геологическая карта М1:500 000	Карта полезных ископаемых Камчатской области, 1999
		S2A_07_2021.tif	безоблачная мозаика космоснимков Sentinel 2, разрешение 10м	
	DEMs		Цифровые модели рельефа	
		SRTM1_UTM.tif	заливка до 150 м над у.м. по SRTM1	
		ArcticDEM.tif	раскраска по высоте ArcticDEM	
		SRTM1_UTM.tif	раскраска по высоте SRTM1	
		SRTM1_slope.tif	теневая отмывка SRTM1	
		SRTM1_hillsh.tif	теневая отмывка SRTM1	
		ArcticDEM_hillsh.tif	теневая отмывка ArcticDEM	
		Kamch_Old.tif	сглаженная теневая отмывка - подложка для иллюстраций	
		Bathimetry.tif	батиметрия окрестностей Камчатки	Селиверстов, 2007

Рис.2. Структура рабочей ГИС.

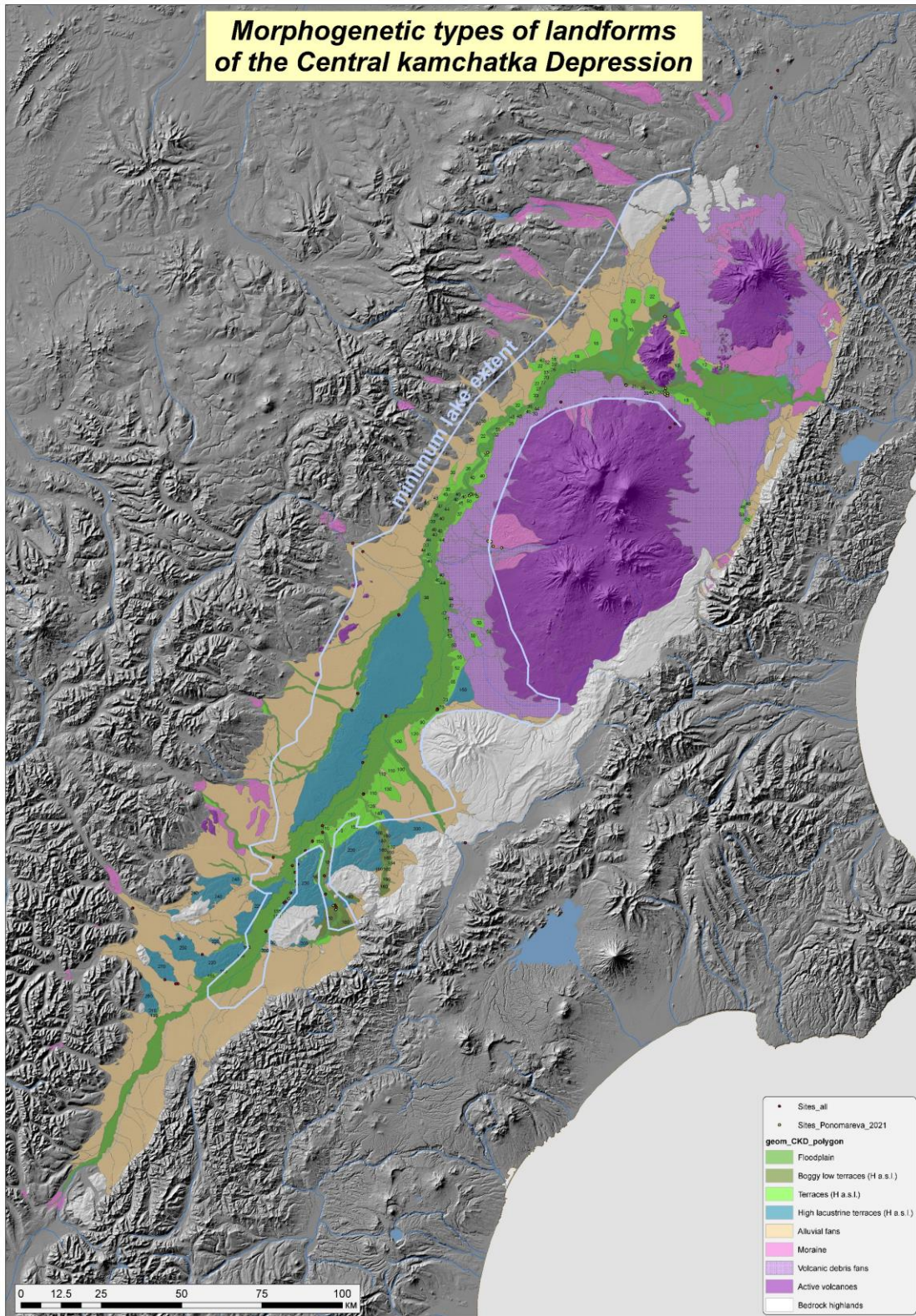


Рис. 3. Рабочая версия геоморфологической карты дна Центральной камчатской депрессии.

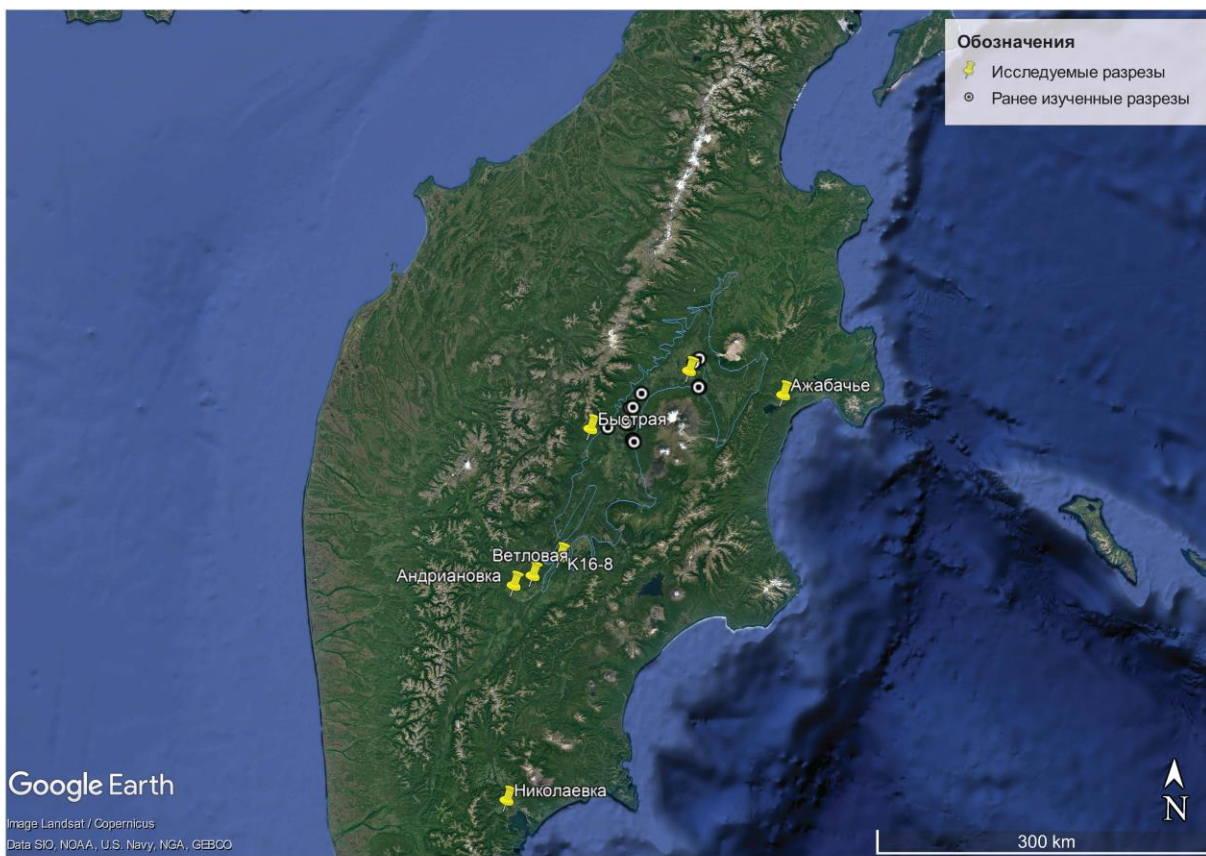


Рис. 4. Положение исследуемых разрезов и ранее изученных и датированных разрезов озерных отложений.



Рис. 5. Серия расчисток разреза Андриановка. Фотомозаика снимков с квадрокоптера.

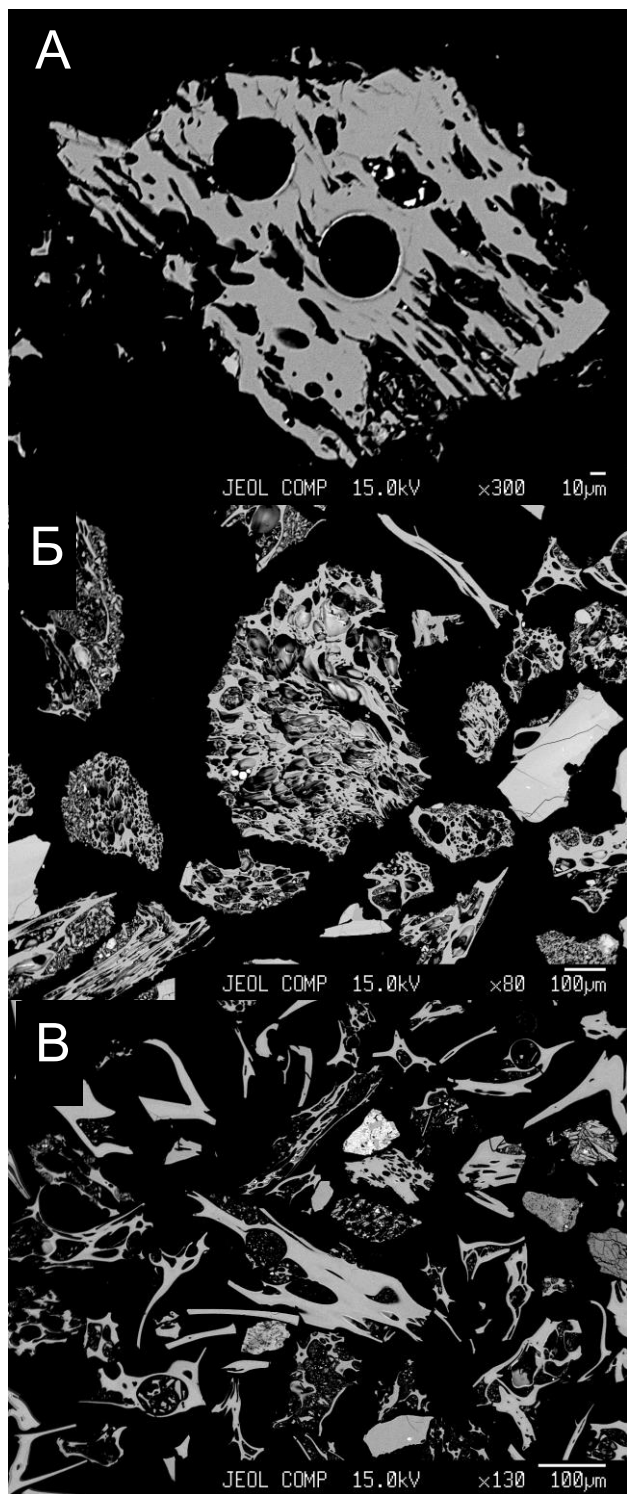


Рис.6. Микрофотографии частиц вулканического стекла из пеплов Камчатки, выполненные на электронном микроскопе в режиме регистрации отраженных электронов. А – тефра вулкана Хангар, видны два кратера диаметром 40 микрон, образовавшихся в результате LA-ICP-MS анализа. Б – тефра Раучуа, основание озерных отложений на р. Ветловой. В – тефра Gor28, разрез в районе оз. Ажабачьего. Масштабная линейка расположена в правом нижнем углу каждой фотографии.

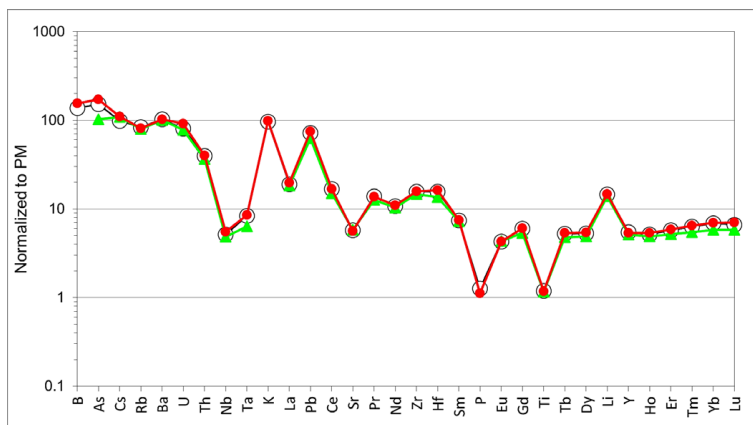


Рис. 7. Корреляция тefеры Рауча (Карымский вулканический центр) между разрезом на р. Ветловой (красный) с колонкой оз. Эльгыгытгын (черный) и разрезом на берегу Сев. Ледовитого океана (зеленый) на основании содержания микроэлементов в вулканическом стекле