

Материал в научно-популярной форме, иллюстрирующий результаты Проекта.

Введение

Магнитное поле – одна из фундаментальных характеристик нашей планеты, изучение геомагнитного поля как физического феномена, в том числе в аспекте его исторического развития, является важным направлением познания окружающего мира. Магнитное поле Земли испытывает непрерывные изменения, которые происходят на разных масштабах времени – от долей секунды до сотен миллионов лет, информация о поведении геомагнитного поля может быть использована и уже используются для решения многих важных задач геологии, геофизики, климатологии, археологии и др.

Изучением истории геомагнитного поля последних тысячелетий является предметом исследований особого научного направления – археомагнитологии.

Данные археомагнитологии остро необходимы для разработки физической теории геомагнетизма, для изучения глубинных оболочек Земли, ближнего космоса, Солнца, крайне важны при исследованиях изменений природной среды, при археологических, палеосейсмологических и вулканологических исследованиях, для оценки вероятности наступления в ближайшем будущем геомагнитной инверсии и т.д.

В последние десятилетия синтез археомагнитных данных реализуется в форме региональных и планетарных геомагнитных моделей, позволяющих описать изменение геомагнитного поля в заданной точке земной поверхности на разных временных срезах голоцена. Разработка качественных моделей требует получения надежных археомагнитных данных достаточно широко распространенных как по поверхности планеты, так и по времени.

Благодаря уникальной истории и богатому культурному наследию, а также хорошей археологической изученности, территория Узбекистана представляет собой перспективный объект для проведения детальных археомагнитных исследований. Эти археомагнитные исследования в настоящее время проводятся в рамках Проекта РФФИ № 18-05-41005, приложением к которому является данный документ.

Главной задачей Проекта является построение детальной региональной опорной кривой, описывающей эволюцию напряженности геомагнитного поля на протяжении последних столетий на территории Центральной Азии.

Построение археомагнитной опорной кривой, описывающей эволюцию напряженности геомагнитного поля на территории Центральной Азии, позволит создать независимый инструмент для датирования геологических катастроф, таких как сильные землетрясения, оползнеобразование, прорывы высокогорных – ледниковых и завальных озер и др. Определение их возраста позволит оценить повторяемость геологических катастрофических процессов за последние сотни и тысячи лет.

Подобные оценки критически важны для геоэкологической безопасности важнейших объектов хозяйствования, таких как гидроэлектростанции, хвостохранилища радиоактивных и токсичных отходов и др.

Между тем, для отработки датирования таких событий археомагнитным методом необходимы, естественно, их идентификация и получение независимых ограничений на их возраст. Выполнение таких работ составляет важную часть нашего Проекта.

Археомагнитные работы, выполненные в течение первого года Проекта.

Изученные объекты и отбор образцов

В 2018 г. в ходе работ, проведенных в г.Бухара, были опробованы архитектурные и археологические памятники XV-XVIII веков второго тысячелетия нашей эры. Среди изученных памятников находятся ряд древних медресе, мечетей, крепость и мавзолей Арк. Всего в ходе работ было опробовано 14 объектов, из которых было взято 220 образцов на лабораторные исследования.



Отбор образцов для археомагнитных исследований из архитектурных памятников г.Бухара

Отбор образцов в г.Бухара происходил в тесном взаимодействии с археологами, при этом обсуждались детали датирования каждого объекта, рассматривались и применялись разные подходы при отборе коллекций.

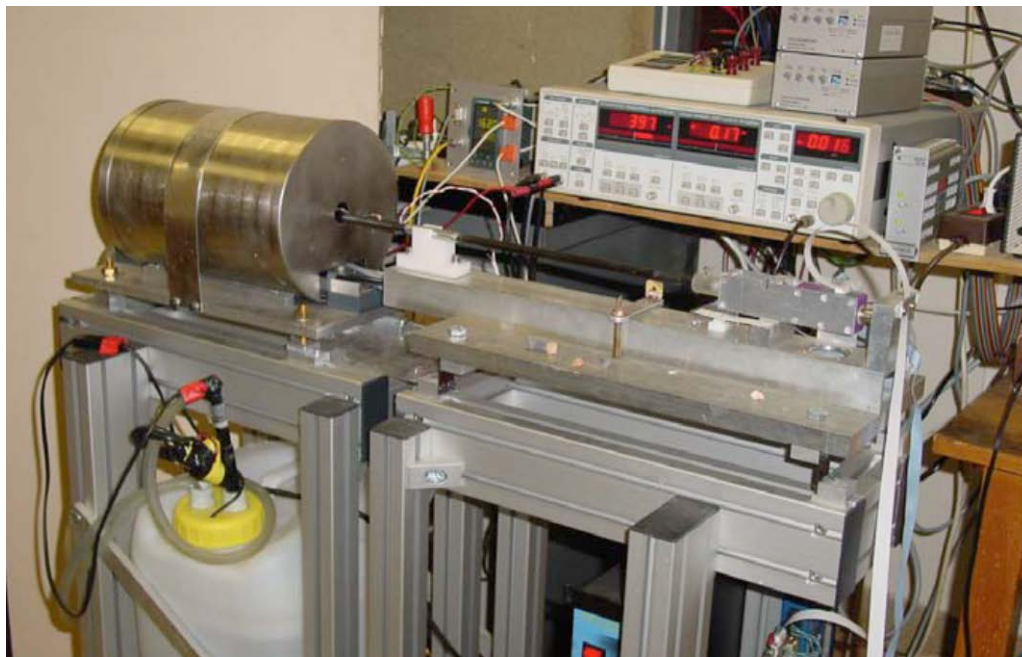


Отбор археоманитных коллекций в Бухаре в 2018 г. совместно с коллегами из АН Республики Узбекистан в присутствии представителей городской администрации.

Лабораторные исследования.

Лабораторные измерения выполнялись в палеомагнитных лабораториях ИФЗ РАН и, частично, в Парижском институте физики Земли (Франция). Исследования выполнялись на передовой аппаратуре, в Геофизической обсерватории “Борок” (Ярославская область) – филиале ИФЗ РАН и в лаборатории палеомагнетизма Парижского Института физики Земли. Используемая аппаратура позволяет выполнять непрерывные высокотемпературные высокоточные измерения непосредственно при высоких температурах. Последнее позволяет существенно увеличить производительность измерений и избежать в значительной степени, магнитоминералогических изменений, которые приводили в предшествующих протоколах, к заметному искажению полезного

сигнала. Используемый измерительный протокол реализует замещение естественной остаточной намагниченности объекта термоостаточной природы, лабораторной термоостаточной намагниченностью, созданной в контролируемых условиях и в присутствии внешнего поля известной напряженности и известного направления.



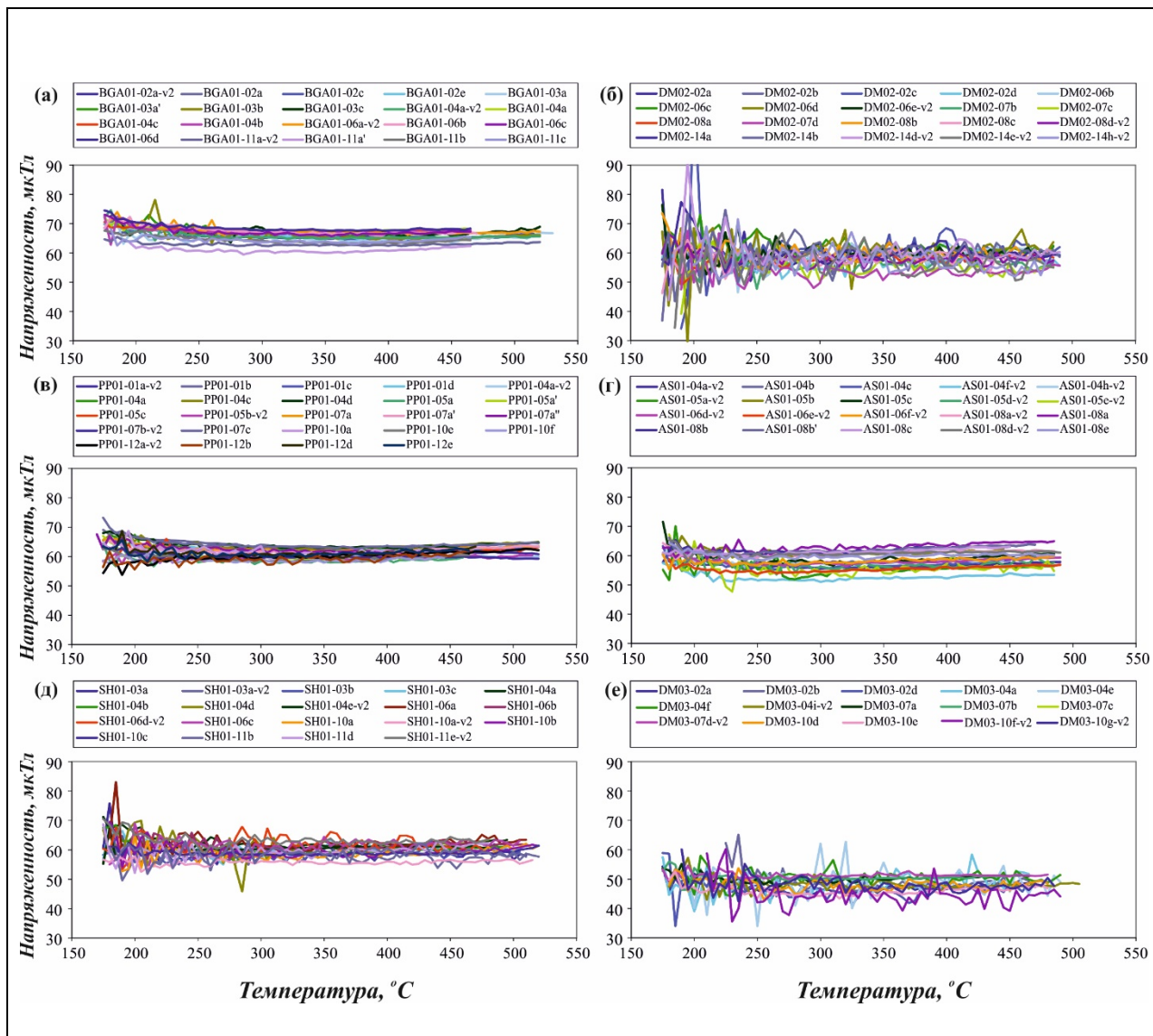
Трехкомпонентный магнитометр, используемый для археоманитных определений.

При измерениях обычно изучаются маленькие цилиндры с диаметром и высотой 1 см, изготовленные из отобранных археоманитных образцов. Измерения полностью автоматизированы и включают в себя процедуру автоматического введения поправки за магнитную анизотропию. Анализ отдельного образца занимает время около 1 часа. Обычно из одного фрагмента анализируется несколько образцов, данные по которым затем усредняются. Аналогичные процедуры выполняются по всем фрагментам из группы, в результате определяется величина напряженности геомагнитного поля, существовавшего в данном месте при изготовлении (обжиге) фрагментов из данной группы.

Полученные результаты

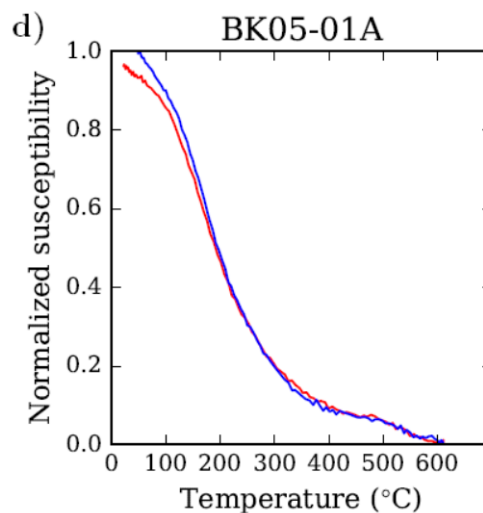
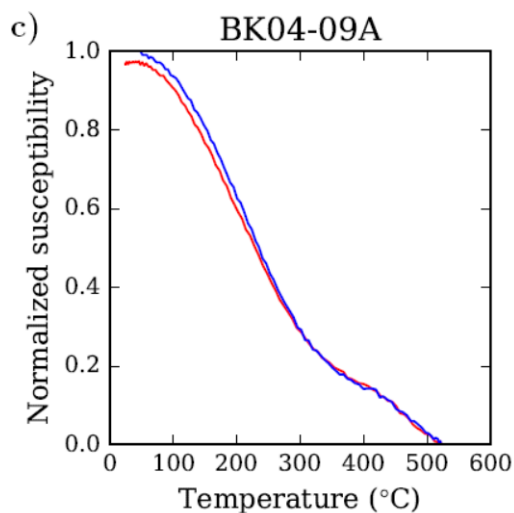
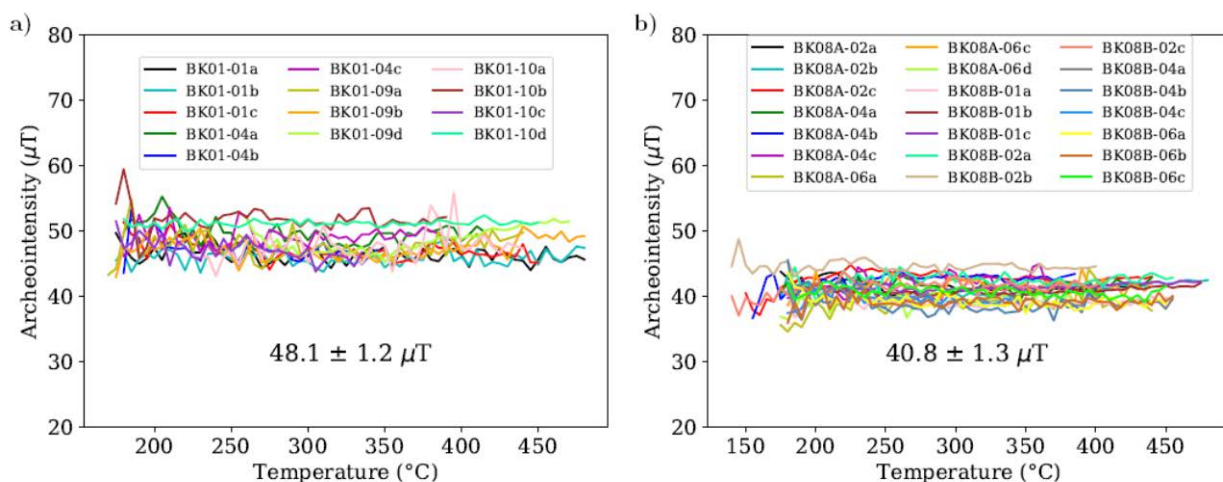
В ходе проведенных лабораторных исследований особое внимание уделялось качеству и надежности получаемых результатов, которые в значительной степени зависят от стабильности магнитной фракции образцов по отношению к нагревам. Для оценки этой стабильности были выполнены специальные исследования, по результатам которых

непосредственно для экспериментов по определению палеонапряженности было оставлено около 30% (51 фрагмент, 154 образца) от исходно отобранной коллекции.



Пример выходных данных по результатам экспериментов по определению напряженности древнего геомагнитного поля. Каждая кривая представляет результат определений для единичного образца.

По всем отобранным образцам были проведены измерения, которые продемонстрировали очень высокое качество археомагнитного сигнала, записанного в исследованных образцах.

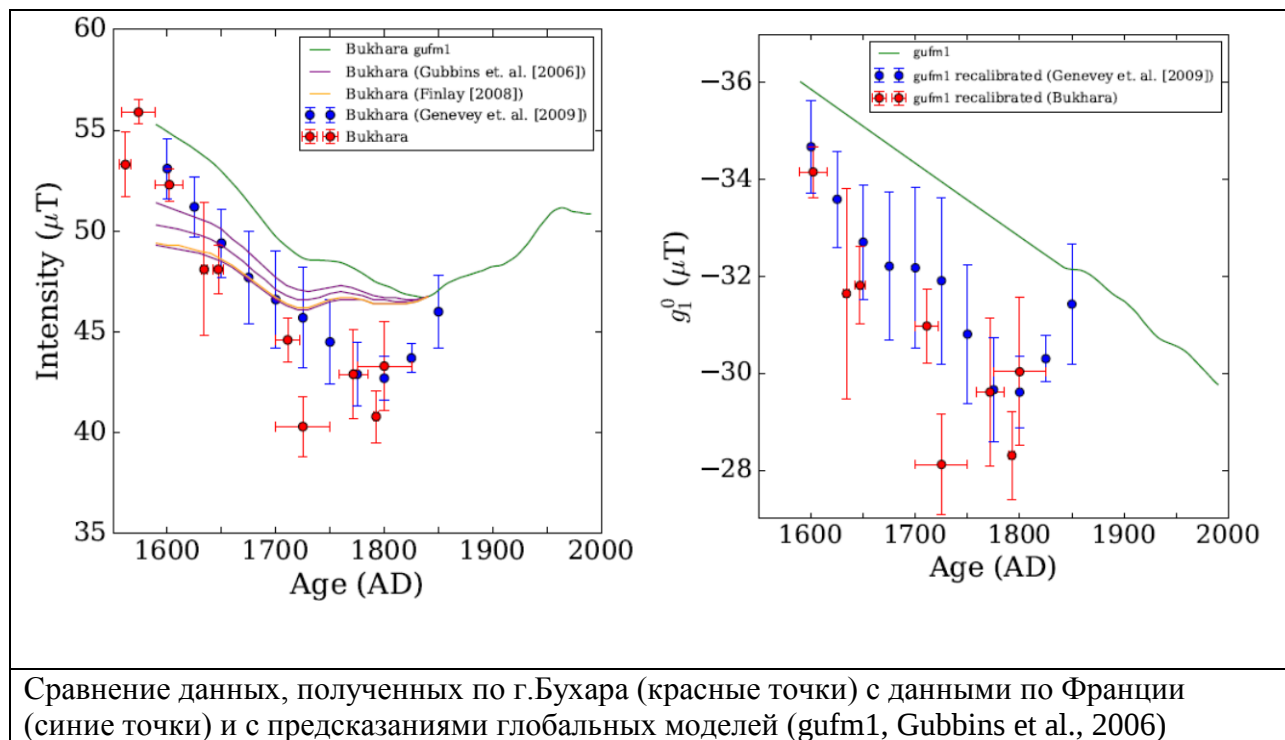


Данные определения палеонапряженности, полученные по двум группам фрагментов: BK01 – возраст 1647 ± 5 год и BK08 – возраст 1792 ± 3 год; c), d) – данные термомагнитного анализа по магнитной восприимчивости - определение магнитной минералогии и магнитной стабильности по отношению к нагревам.

В результате проведенных работ была получена серия археомагнитных определений, описывающая поведение геомагнитного поля на территории Бухары для интервала времени между концом XVI и началом XIX веков второго тысячелетия нашей эры.

Археомагнитная группа	Возраст (годы)	Погрешность определения возраста (годы)	Палеонапряженность (мкТ)	Погрешность определения (мкТ)	N Число фрагментов	N Число образцов
BK01	1647	5	48,1	1,2	4	13
BK04	1561.5	5.5	53,3	1,6	8	24
BK05	1602	13	52,3	0,8	5	15
BK06	1573.5	15.5	55,9	0,6	3	9
BK07	1711	11	44,6	1,1	3	9
BK08	1792.5	2.5	40,8	1,3	7	21
BK11	1800	25	43,3	2,2	6	18
BK12	1634	3	48,1	3,3	4	12
BK13	1725	25	40,3	1,5	6	18
BK14	1771.5	13.5	42,9	2,2	5	15

Эти данные, описывающие вариации напряженности геомагнитного поля в течение нескольких столетий, предшествующих началу непосредственных обсерваторских измерений, были сопоставлены с предсказаниями ряда глобальных геомагнитных моделей, предложенных к настоящему времени. Это позволило тестировать рассмотренные модели и выбрать те из них, которые наиболее адекватно описывают поведение геомагнитного поля на территории Узбекистана



Показано, что предсказания наиболее популярной в настоящее время модели *gufm1*, заметно отклоняются от наблюдаемых данных. Это означает, что модель *gufm1* нуждается в корректировке.

Эта модель была рекалибрована с учетом данных, полученных по Бухаре. В результате были получены новые коэффициенты сферического разложения, которые позволили уточнить характер изменения дипольной составляющей геомагнитного поля на протяжении второй половины второго тысячелетия.

Новая версия модели, построенная с учетом данных по Бухаре показывает, что для последних четырех веков имеющиеся данные довольно хорошо согласуются с синусоидальной эволюцией планетарного дипольного магнитного момента, наложенной на регулярный квази-линейный тренд убывания напряженности, с характерным временем, превышающим длительность рассматриваемого временного интервала.

Полученные результаты были также сопоставлены с аналогичными данными, полученными для территории Франции для этого же периода времени, но пересчитанными на широту г.Бухары. Эти данные довольно хорошо согласуются друг с другом, что свидетельствует в пользу отсутствия значительного вклада недипольных источников в магнитное поле территорий, расположенных между и прилегающих к территориям Узбекистана и Франции.

Архео- и палеосейсмология.

Ферганская долина.

В ходе проведенных работ проведены археосейсмологические полевые исследования на древних городищах Эйлатан и Куюльтепа в Ферганской долине (Наманганская область, Узбекистан). Оба городища несут следы сильнейших сейсмических воздействий. В Эйлатане выявлено систематическое левостороннее смещение субмеридиональных стен на 4 м по субширотному сейсмогенному разрыву. В Куюльтепе в археологическом раскопе нами зафиксированы многочисленные разрывы со смещениями небольшой амплитуды и трещины. Показано, что Эйлатан был разрушен в I в. до н.э. сильнейшим ($M_s=7.6$, $I_0=X$ баллов) землетрясением, сейсмогенный разрыв которого вышел на поверхность на территории городища. После это сейсмического события люди покинули территорию древнего города и построили небольшие населенные пункты вокруг него. Однако другое сильное землетрясение ($I=VIII-IX$ баллов в Куюльтепе) в начале 1-го тысячелетия н.э. разрушила и эти поселки. Полученные данные могут быть использованы для новой оценке сейсмической опасности Ферганской долины.



Городище
Куюльтепа,
Ферганская
долина,
Узбекистан,
2019 г.



Сейсмогенные
трещины и
разрывы
вскрытые
археологическими
раскопками в
урочище
Куюльтепа

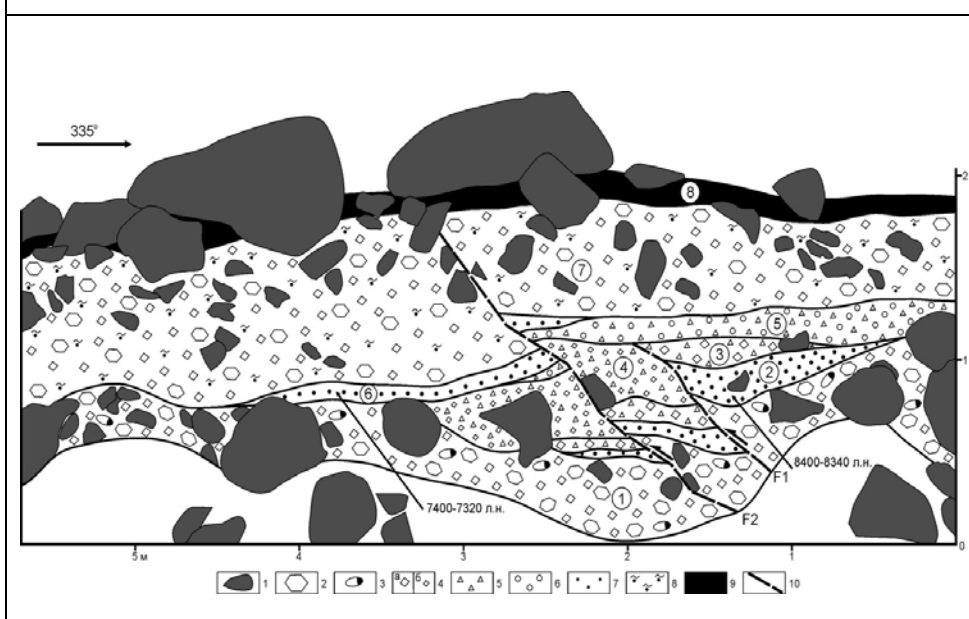


Юго-Западное Прииссыккулье, Тянь-Шань.

Выполнены работы, направленные на изучение палеосейсмичности вдоль зоны предгорного Коконадыр-Тегерекского разлома (КТР) в ЮЗ Прииссыккулье. Показано, что основная часть выходов сейсмогенных разрывов на поверхность смещается на сотни метров к югу от упомянутого разлома, приводя к формированию многоактных сейсмоуступов и компенсационных грабен в их тыловой части. По данным радиоуглеродного датирования вдоль зоны КТР имели место четыре сильные голоценовые землетрясения, произошедшие во временные интервалы: 1771-1785 гг. н.э., 1440-1515 гг. н.э., а также вероятно в 2310-745 гг. до н.э. и 6400-5300 гг. до н.э. Судя по параметрам разрывов / сейсмоуступов их магнитуда была $M \geq 7$, а сейсмическая интенсивность $I_0 \geq IX$ баллов. Сильная сейсмическая активность вдоль зоны КТР продолжается, по крайней мере, со среднечетвертичного времени, о чем свидетельствуют ветровые бреши этого возраста в одноименном поднятии и значительные накопления озерных осадков в северной части Алаба-Конуролёнградской впадины, связанных с таянием ледников на северном склоне хребта Терской Ала-Тоо, свидетельствующие о значительном тектоническом подпруживании. На основе полученных палеосейсмологических данных предложена модель, объясняющая формирование предгорий в южной части Иссык-Кульской котловины. Полученные материалы могут быть использованы при построении новой Карты сейсмической опасности для Центральной Азии.



Сейсмоуступы
вдоль южного
подножия
Коконадыр-
Тегерекского
поднятия



Один из
разрезов,
рассекающих
сейсмогенный
уступ. Крупные
обломки отме-
чают крупные
сейсмические
события.