

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ

УДК 551.24

ПАЛЕОСЕЙСМИЧНОСТЬ ЮЖНОГО ПРИИССЫККУЛЬЯ  
И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КАДЖИ-САЙСКОГО УРАНОВОГО  
ХВОСТОХРАНИЛИЩА (КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА)

© 2022 г. Л. А. Корженкова<sup>1,\*</sup>, А. М. Корженков<sup>2</sup>, В. М. Макеев<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта,  
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

\*E-mail: korjenkova2404@mail.ru

\*\*E-mail: vmakeev@mail.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022 г.

После доработки 17.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Исследование направлено на изучение редкой и сильной палеосейсмичности Южного Прииссыккулья методами палео- и археосейсмологии. В средневековье этот регион находился под неоднократным воздействием землетрясений, которые могли приводить к катастрофическим последствиям – разрушению средневековых цивилизаций. Подобные негативные процессы не исключены и в настоящее время. Регион исследований включает южные прибрежные зоны оз. Иссык-Куль с их промышленной, селитебной, хозяйственной и др. инфраструктурой. Палеосейсмологические исследования в Южном Прииссыккулье позволили впервые выявить выходы очагов сильных древних землетрясений – сейсмоуступов, в непосредственной близости от Каджисайского хвостохранилища. В плейстосейстовых ареалах землетрясений выявлены значительные скальные обрушения: обвалы, срывы и оползни. На основе радиоуглеродного датирования образцов определены возрасты этих сейсмических событий. Установлена их повторяемость – раз в несколько сотен лет, магнитуда  $M_s \geq 7$  и сейсмическая интенсивность  $I_0 \geq IX$  баллов. Структурная позиция землетрясений, очаги которых локализируются в верхней части земной коры, связывается с неотектоническими и современными зонами дислокаций. Ими являются глубинные взбросо-надвиги с южным падением и предгорные поднятия-адыры взбросового типа с северным. Последние локализованы во фронтальной части крупных поднятий, надвигающихся на прогибы. Образование этих зон со встречным типом развития связывается с субгоризонтальным сокращением земной коры Тянь-Шаня и ее орогенезом. Вещественно-структурные процессы приводят к перераспределению мощности земной коры и формированию высоких гор. По причине встречных деформаций в разломах происходит концентрация напряжений и деформаций – формирование потенциальных очагов сейсмичности, в т.ч. катастрофического характера. Территория Каджи-Сайского уранового хвостохранилища подвергается угрозе разрушения по причине сейсмической опасности и вторичных интенсивных экзогенных процессов – оползней и селей. Землетрясения, как правило, вызывают оползание полускальных неогеновых пород иссык-кульской свиты, на которых залегают радиоактивные отходы. Установлено, что атмосферные воды, размывающие хвостохранилище, текут не только в селеуловитель, но и мимо него – в направлении оз. Иссык-Куль. Вода, накопившаяся за природными дамбами на склонах хребтов, может прорвать удерживающие их препятствия и превратиться в мощный грязекаменный селевой поток. Существующие селеуловители по объемам и местоположению ныне не отвечают существующей угрозе. Для организации инженерной защиты площадок размещения радиоактивных отходов от негативных процессов предлагается провести дополнительные уточняющие исследования, связанные с оценкой сейсмической, оползневой и селевой опасности.

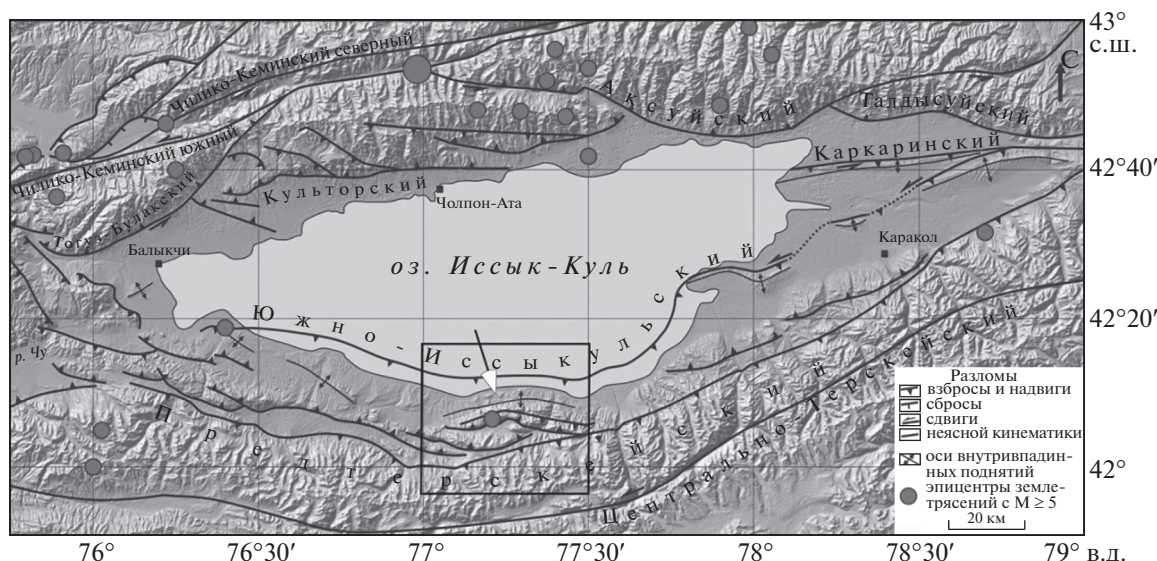
**Ключевые слова:** палеосейсмология, археосейсмология, разломы, сейсмоуступы, обвалы, осыпи, скальные оползни, урановое хвостохранилище, торткули, адыры, караван-сарай

DOI: 10.31857/S0869780922060054

ВВЕДЕНИЕ

Регион исследования находится в горной Иссык-Кульской области Кыргызской Респуб-

лики (Южное Прииссыккулье) (рис. 1), которая характеризуется высокой сейсмической активностью [5, 9].



**Рис. 1.** Неотектонические структуры Прииссыккулья. Рельеф создан с использованием программного пакета GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org>). Прямоугольник – район детальных исследований. Стрелка указывает на площадку Каджи-Сайского уранового хвостохранилища.

Горы этой страны – высококонтрастные, созданы относительно медленными дифференцированными неотектоническими движениями. Но наибольшую опасность вызывают непредсказуемые разрушительные сейсмогенные дислокации. Они сопровождаются образованием сейсмодислокаций: уступов, обвалов, оползней, селей и проч. Подобного рода сейсмогенные процессы могут угрожать району расположения Каджи-Сайского радиоактивного хвостохранилища, которое осталось после закрытия шахты по добыче урана.

В рассматриваемом регионе широко распространены позднепалеозойские отложения, смятые в складки и нарушенные разрывами. Отложения прорваны интрузивными позднепалеозойскими массивами кварцевых порфиров, фельзитов ( $D_3-C_1$ ) и ордовикских гранитов. С угловым и стратиграфическим несогласием складчато-разрывные отложения перекрываются красноцветными субплатформенными олигоцен-миоценовыми отложениями, залегающими на эпигерцинской древней денудационной поверхности. В мезозое Южное Прииссыккулье было частью обширного пенеппена, который в новейшее время подвергся деформациям с образованием разновысотных поднятий и прогибов. Фрагменты этого пенеппена можно наблюдать на водоразделах и на его склонах, что позволяет определить амплитуды и скорости поднятий за новейшее время и отдельные его этапы.

В новейший тектонический этап (Pg3-Q) палеозойские структуры подверглись деформациям с образованием мегасинклинориев (прогибов) и

мегантиклинориев (поднятий), а также субширотных взбросов [12]. В аспекте неотектоники – это структуры, которые поныне формируются в условиях преимущественно горизонтального сжатия. Наиболее ярко выражен Иссyk-Кульский прогиб, который наследуется одноименным озером. Он выполнен молассовыми мезозойско-кайнозойскими отложениями мощностью более 5 км. К югу прогиб сопряжен с поднятием Терсей-Ала-Тоо. В условиях сопряженного развития происходило образование разломов: Южно-Иссykкульского, Предтерсейского и Центрально-Терсейского. Первый разлом локализован в зоне сопряжения Иссyk-Кульской впадины и адырных поднятий Терсей-Ала-Тоо, второй прослеживается на границе хребет-впадина, и третий приурочен к центральной части поднятия Терсей-Ала-Тоо. С активностью разломов связывается образование адырных (предгорных) разломов – характерной черты строения Южного Прииссыккулья [1].

Землетрясения – это индикаторы существования в земной коре аномально высоких напряжений. Их образование вызвано горизонтальным сокращением коры в связи с встречной коллизией литосферных плит и блоков [12]. Сильные землетрясения сопровождаются выходом очага на земную поверхность и образованием сейсморазрывов и оползней, на основании которых устанавливаются параметры очага землетрясения – его возраст, магнитуда и сотрясаемость в эпицентральной зоне. Самым известным является разрыв, выявленный в долине сухого сая Тегерек – левого притока р. Тоссор [6, 7]. По нему неодно-

кратно проходили землетрясения, по крайней мере, в течение голоцена, по этой причине он рассматривается в качестве сейсмогенерирующего. Хорошо известен Тоссорский позднеголоценовый сейсмообвал, образованный на южном крыле одноименного поднятия.

Цель исследования – изучение сильной палеосейсмичности и сейсмодислокаций Южного Прииссыккулья методами палео- и археосейсмологии. Сильные землетрясения могут являться причиной катастрофических геологических проблем. В рассматриваемом регионе расположена селитебная, культурная, хозяйственная и др. инфраструктура, тяготеющая к побережью оз. Иссык-Куль [2, 4, 15]. Особо отметим наличие заброшенных после добычи урана радиоактивных хвостохранилищ. Обеспечение безопасности этих объектов на основе изучения сейсмодислокаций, оценки их возраста и периодичности землетрясений, включая определение их структурной позиции является актуальной задачей.

### СЕЙСМОДИСЛОКАЦИИ ЮЖНОГО ПРИИССЫККУЛЬЯ

Сейсмодислокации Южного Прииссыккулья распространены в пределах впадин Тегерек-Сай (Колкагарская мульда) и Каджи-Саз, поднятий Чункурчак и Тегерек-Санчик (Средне- и Нижнетоссорские поднятия соответственно) и зоны Предтерской разлома. Эти структуры отчетливо выражены в деформациях эпигерцинского пенеплена, который у Колкагарской мульды и Среднетоссорского поднятия сложен красноцветами киргизской серии позднеолигоцен-миоценового возраста, а у Нижнетоссорского поднятия – палеовой толщей тянь-шаньской серии миоцен-плиоценового возраста [12]. На северных крыльях этих структур пенеплен падает под углом 45–50°, а на южных крыльях он более пологий.

Сейсмодислокации исследованы в трех районах: долины рек Тегерек-Сай и Каджи-Саз и окраина современного с. Тоссор на территории средневекового караханидского городища (X–XII вв.).

*Долина ручья Тегерек-Сай* является левым притоком р. Тоссор. В этой долине выявлены сейсморазрывы (рвы), выраженные в том числе структурными уступами; скальные оползни и осыпи (срывы).

На правом склоне руч. Тегерек-Сай расположен протяженный сейсморов – выход древнего сейсмического разрыва на земную поверхность. Его размеры: глубина до 7 м, ширина до 30 м. Магнитуда  $M_s \geq 7$  единиц и сейсмическая интенсивность  $I_0 \geq IX$  баллов [10]. Опыт изучения современных даже самых сильных землетрясений не знает примеров образования дислокаций та-

ких размеров. Возможно, что своими значительными размерами ров обязан нескольким сейсмическим событиям, связанным с одним и тем же глубинным разломом.

На левом склоне рассматриваемого ручья в каледонском интрузивном массиве произошел значительный по размеру сейсмодислокационный срыв (рис. 2). Его длина 2 км, ширина от 500 до 1250 м. Отырив выражен дугообразный стенкой протяженностью 15 км, высота которой изменчива от 60 м на востоке до 100 м на западе. Мощность сорванного массива скальных пород равна ~60 м. Объем обвала составляет приблизительно 10 млн м<sup>3</sup>.

На сошедшем вниз скальном массиве обнаружены необычные для Тянь-Шаня древние захоронения: прямоугольная в плане выкладка камней над могилой. Обычные для Тянь-Шаньского региона сако-усуньские захоронения имеют округлую в плане каменную выкладку [3]. Прямоугольная форма надмогильных выкладок характерна лишь для одного народа, жившего на Тянь-Шане в V–VIII вв. н.э., – для тюрков. Следовательно, можно отметить, что главный скальный срыв мог произойти раньше этого времени.

Восточнее на продолжении сейсморова выявлен сейсмогенный уступ. С целью определения возраста сейсмического события, через западное окончание уступа была пройдена палеосейсмологическая траншея с отбором проб на радиоуглеродный анализ [15]. Горная выработка ориентирована субмеридионально, ее протяженность 5.9 м и глубина около 2.2 м. Из нее из разновозрастных гумуссированных суглинков (палеопочв) были отобраны пробы на радиоуглеродный анализ: DEKG-1, 2, 3 и 4.

Восточная стенка траншеи, сложенная слоистым аллювием, детально описана снизу вверх по разрезу (рис. 3).

Слой 1. Светло-коричневые суглинки с мало-мощными до 15 см линзовидными прослоями дресвы делювиального происхождения. Мощность слоя около 0.7 м.

Слой 2. Палеовая дресва с суглинистым заполнителем делювиального происхождения мощностью 0.7 м. Залегание слоев 1 и 2 нарушено двумя взбросовыми трещинами, падающими на юг под углами 25–30°. Амплитуда смещения по падению у нижнего взброса составляет 1.25 м, у верхнего – 1.6 м.

Слой 3. Палеовая дресва с супесчаным заполнителем делювиально-коллювиального происхождения мощностью 0.9 м. Присутствуют многочисленные валуны и отломы, фрагменты коричневых слабогумуссированных суглинков, которые рассматриваются в качестве коллювиального клина, накопившегося в тыловой части сейсморова.

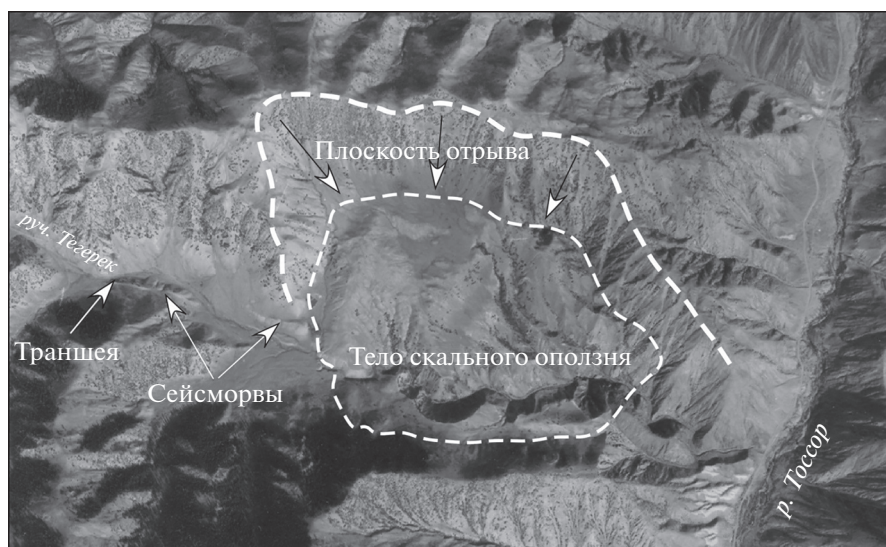


Рис. 2. Тоссорский сейсмодислокационный обвал (скальный оползень) в долине руч. Тегерек-Сай (аэрофотоснимок).

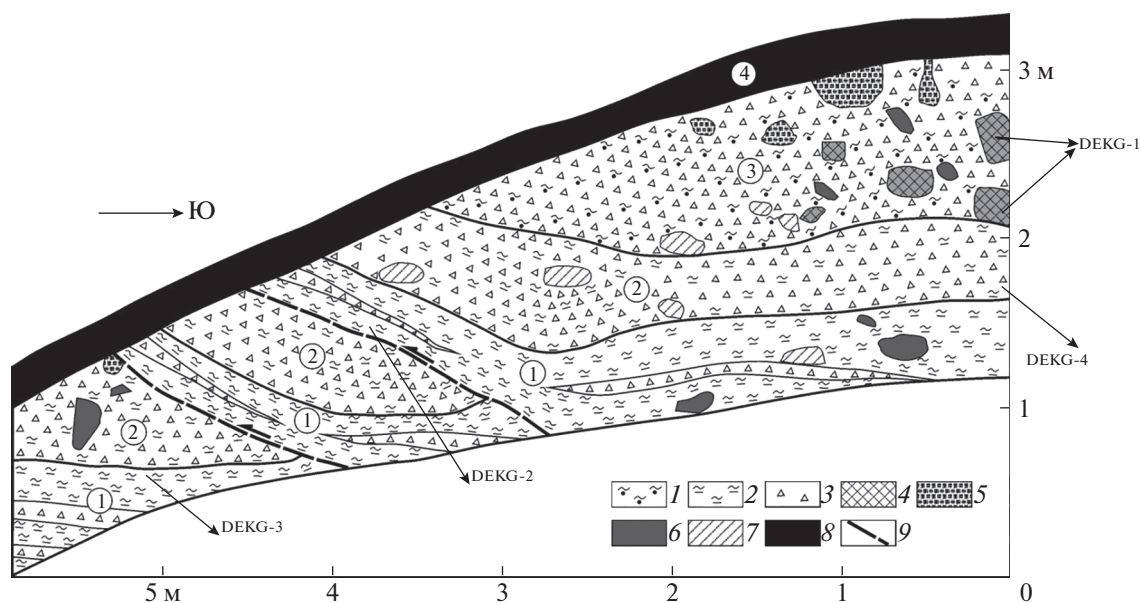
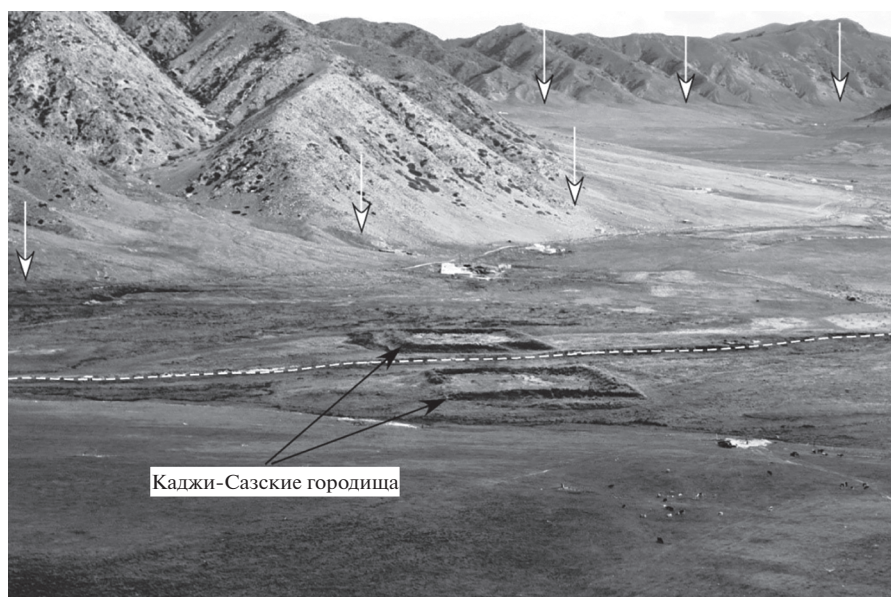


Рис. 3. Восточная стенка палеосейсмологической траншеи в урочище Тегерек-Сай [15]. 1 – супеси, 2 – суглинки, 3 – дресва, 4 – палеопочва, 5 – кротовины, 6 – валуны и отломы, 7 – отпечатки от выпавших валунов, 8 – современная почва, 9 – трещины взбросового типа. Сплошными линиями проведены границы между слоями. В кружках номера слоев. DEKG-1 и т.д. – место отбора проб и их номер.

Слой 4. Коричневая современная бедная гумусом горная почва, несогласно залегающая на подстилающих ее слоях, мощностью до 0,3 м.

Таким образом, в разрезе восточной стенки вскрыты сейсмогенные трещины взбросовой кинематики, принадлежащие, вероятно, самому позднему палеоземлетрясению, так как трещины и коллювиальный клин, накопившейся в тыловой части сеймоуступа, перекрываются исключительно современной почвой (см. слой 3). Воз-

раст отобранных проб был определен в лаборатории Центра по исследованию природы в г. Вильнюс. Датировки показали, что подвижки по сейсмогенерирующему разлому и перетрясывание скального оползня произошли во время последнего достаточно сильного землетрясения, произошедшего на рубеже IX–XI вв. (в пределах ошибки метода). В более раннее время до строительства турецких прямоугольных надмогильных выкладок в V–VIII вв. также могли происходить



**Рис. 4.** Средневековые городища Каджи-Саз (караван-сарай) в одноименном урочище. На переднем плане в виде пунктирной линии — antecedентный участок р. Каджи-Сай, на заднем плане поднятие Тегерек. Стрелками показан Каджи-Сазский взбросовый разлом.

сильные землетрясения, на что указывает сейсморов необычного размера.

В *Каджи-Сазской впадине*, расположенной в сопряжении хребтов Тегерек и Кызыл-Кунгей на севере и хребтом Терской Ала-Тоо на юге, на территории двух средневековых Каджи-Сазских городищ (Западное и Восточное) были проведены палеосейсмологические исследования (рис. 4).

Городища приурочены к урочищу Каджи-Саз, которое ныне заболочено вследствие тектонического подпора растущим, но слабо выраженным в рельефе поднятием Тегерек-Санчик. Это поднятие рассматривается в качестве передового предгорного — адырного. Река, текущая через урочище в оз. Иссык-Куль, прорезает в поперечном направлении это поднятие, что позволяет относить этот участок реки к antecedентному. Подобного типа участки рек указывают на повышенную современную тектоническую активность поднятий, часто связанную с разломами. Данная обстановка не стала исключением. Здесь выделяется Каджи-Сазский неотектонический взброс, по которому происходят поднятие гор Тегерек и Кызыл-Кунгей и их надвигание на внутригорную впадину.

Западное и Восточное городища расположены в 200–300 м друг напротив друга на берегах р. Каджи-Саз. Они предназначались для охраны и обслуживания в средневековое время горного прохода на одной из ветвей Великого шелкового пути. Относительный возраст городищ был определен археологом Д.Ф. Винником по подъемной керамике как караханидский (X–XII вв. н.э.) [3]. Трудно предположить, что указанные караван-

сарай (крепости) были построены в сыром урочище или на болоте, так как есть более высокие и сухие участки в долине. Наиболее вероятно, что караван-сарай были возведены на сухих участках, но интенсивные поднятия хребта Тегерек привели к подпруживанию р. Каджи-Саз и образованию сначала озера, затем болота в одноименной долине.

На основании аэрофотоснимков и полевых наблюдений в зоне Южно-Тегерекского разлома был выявлен сейсмоуступ, свидетельствующий о быстрых импульсных сейсмодвижках по разлому [15]. Относительно небольшой по меркам геологии возраст городищ и их быстрое заболачивание указывают на высокие скорости сеймотектонического поднятия по сейсмоуступу. В поперечном направлении к нему была вырыта траншея по азимуту  $310^\circ$ , длиной 26.5 м и глубиной 2.3 м (рис. 5).

В С–СЗ стенке траншеи были вскрыты слои (снизу вверх), нарушенные разнотипными трещинами.

Слой 1. Бурые отложения пролювиального происхождения мощностью более 0.5 м.

Слой 2. Неокатанные и слабоокатанные глыбы и валуны со светло-коричневым суглинистым заполнителем мощностью 0.9 м. Слой нарушен двумя системами разрывов неясной кинематики. Из приповерхностной части слоя были взяты раковины пресноводных брюхоногих моллюсков (раковин) на радиоуглеродный анализ методом AMS<sup>14</sup>C. Результаты анализа показали, что их возраст составляет  $42100 \pm 1500$  ВР (лет назад)

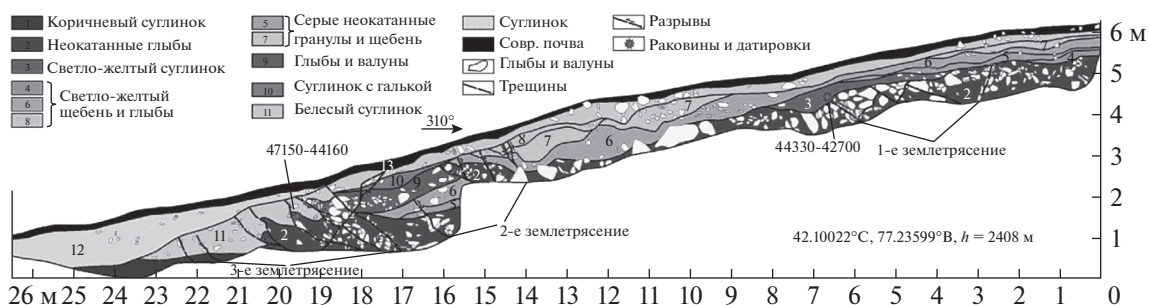


Рис. 5. Строение отложений в С-СЗ стенке траншеи [15]. Цифры 1, 2 и далее по порядку – номера слоев. Цифры 47150-44160 и 44330-42700 калиброванный возраст (*cal*) проб Poz-66170 и Poz-66202 соответственно и места их отбора.

(обр. Poz-66170). Калиброванный (уточненный) возраст (*cal*) – 47 150–44 160 ВР.

Слой 3. Светло-желтая супесь мощностью 0.5 м. В основании слоя были собраны раковины пресноводных брюхоногих моллюсков на AMS <sup>14</sup>C. Возраст раковин составил 39 700 ± 1000 лет назад (обр. Poz-66202). Калиброванный возраст (*cal*) – 44 330–42 700 ВР.

Слои 4, 6, 8. Линзовидное чередование крупного щебня и глыб со светло-желтым супесчаным заполнителем. Линзы разной мощности.

Слои 5 и 7. Серая дресва и щебень с песчаным цементом. Мощность отдельных линз составляет от 0.1 до 0.9 м. В них развита система обратных разрывов, падающих на север. Смещение слоев составляет от 0.1 до 1.8 м.

Слой 9. Серые неокатаные и полуокатаные валуны и глыбы с песчаным и супесчаным заполнителем.

Слой 10. Серая супесь с щебнем неясной мощности.

Слой 11. Беловатая супесь мощностью 1 м. В слоях 1, 2 и 11 были обнаружены несколько обратных разрывов и трещин с северным падением. Смещения по плоскостям разрывов составляют 0.1–0.7 м.

Слой 12. Светло-коричневая супесь мощностью до 1 м.

Слой 13. Завершает разрез современная горная почва мощностью 0.2–0.3 м.

По наличию трещин и разрывов и, согласно определению возраста образцов, установлено, что всего было три землетрясения. Первое самое древнее произошло приблизительно 40 000 лет назад, второе и третье позже, точный возраст которых установить не удалось. Но по генерациям трещин и строению рельефа выявлено, что во время первого землетрясения образовались трещины в нижней части уступа, во время второго – трещины в верхней его части. Во время третьего землетрясения – самого молодого – был образован уступ в современной форме. Разрывы (взбро-

сы) 2-го и 3-го землетрясений имеют отчетливую взбросовую кинематику. По величине косейсмических разрывов с использованием эмпирического соотношения Уэллса и Копперсмита оценена моментная магнитуда 2-го и 3-го землетрясений:  $M_w = 7.1$  и  $M_w = 6.8$  соответственно [10, 16].

За пределами городища Каджи-Саз в северном крыле одноименной впадины в неоген-четвертичных отложениях, вскрытых р. Каджи-Сай, установлены современные разрывы-взбросы, которые подтверждают воздействие напряжений сжатия на впадину со стороны поднятия Тегерек. Под его воздействием формируется адырное поднятие – Тегерек-Санчик, с ростом которого связаны тектоническое подпруживание и формирование antecedentного участка р. Каджи-Сай.

На западной окраине современного села Тоссор были проведены археосейсмологические исследования средневекового караханидского городища – торткуль Тоссор (X–XII вв.) (рис. 6).

Караханидский возраст городища был определен Д.Ф. Винником [3]. Торткуль Тоссор находится в 20 км на В–СВ от описанных Каджи-Сазских городищ в пределах ядра растущего Тоссорского антиклинального поднятия, которое слабо выражено в рельефе [8]. Его южное крыло крутое и относительно узкое сложено позднеплейстоценовыми суглинисто-песчаными отложениями озерного генезиса (Q<sub>III</sub>). Пологое и широкое северное крыло перекрыто аллювиальными крупнозернистыми песками. Южное крыло вскрыто в карьере, вырытом в непосредственной близости на южной окраине городища. Азимут падения крыла 180° под углом 20°. Аллювиально-пролювиальная равнина, отвечающая пологому крылу, падает на север – к Иссук-Кулю. Перед южной стеной городища крыло быстро меняет угол наклона на противоположный, т.е. на северный 360°.

Для палеосейсмологических исследований была вырыта широтная траншея, вскрывшая в поперечном направлении восточную стену городища [8]. В траншее и стене выявлены отчетливые



**Рис. 6.** Средневековое городище торткуль Тоссор. Стрелками указаны остатки разрушенных башен некогда укрепленного городища. Помпезные башни – современные киргизские захоронения.

разной генерации трещины, относящиеся к двум сейсмическим событиям разного возраста.

Во время первого события обломки верхней части стены отлетели в восточную сторону на расстояние до 6 м, сопоставимое с изначальной высотой стены. Это факт свидетельствует о сильных сейсмических сотрясениях, так как при обычном “статическом” разрушении стен со временем подавляющая часть обломков должна была упасть на расстояние, не превышающее 1/3 высоты стены [14]. Точную дату этого события установить не удалось, но по накопившимся в основании стены пылевато-песчаным частицам и характеру нарушений, вскрытых в канаве, можно уверенно предположить, что первое событие случилось намного лет раньше не менее сильного второго события.

Во время второго сейсмического события нижняя часть восточной стены подверглась сильному нарушению, включая накопившийся после первого события мелкозем – пылевато-песчаные образования. В восточной части траншеи образовалась трещиноватость по типу “цветочной структуры”, в западной части – клинообразная раскрытая трещина, внутрь которой провалились обломки верхней части стены. Под ними обнаружен обширный слой углей от пожарищ мощностью до 3 см. Радиоуглеродный возраст этих углей на  $C^{14}$  показал 1020–1190 гг. н.э. (XI–XII вв. н.э.), что согласуется с возрастом археологических артефактов.

При интенсивных сейсмических колебаниях большой ущерб с жертвами приносили не только механическое разрушения стен, но пожары, связанные с повреждением и разрушением светильников и печей. Разрушение источников света и тепла в средневековое время приводило к началу больших пожарищ, под действием которых довершался окончательный развал построек. Подобные факты с максимальным количеством жертв при пожарах в населенных пунктах наблюдаются ныне при современных землетрясениях.

### СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При изучении сейсмических событий важное значение имеет структурно-тектоническая оценка плейстосейстовых зон землетрясений. В Южном Прииссыккулье они приурочены к разломам, сопряженным с антиклинальными изгибами (поднятиями), и рассматриваются как зоны современных дислокаций сейсмогенного типа. В рельефе они выражены предгорными адырами, согласными с однопорядковыми впадинами. Различаются следующие подобного типа структуры: поднятие-адыр Тегерек-Санчик, сопряженное с Каджи-Сазской впадиной; поднятие-адыр Чункурчак, сочленяющееся с впадиной Тегерек-Сай. Все структурные формы характеризуются южно-асимметричным строением.

По морфолого-кинематическому типу разломы, связанные с адырами, являются взбросами, падающими на север, т.е. в обратную сторону относительно Предтерского и Южно-Иссыккульского глубинных разломов, падающих на юг (см. рис. 1). Адырные взбросы локализованы на сопряжении крупных новейших мегаструктур: поднятия Терской Ала-Тоо (мегантиклинорий) и впадины Иссык-Куль (мегасинклинорий). Установлено, что по глубинным разломам происходит надвигание поднятия Терской Ала-Тоо, представленного преимущественно палеозойскими складчато-разрывными структурами, на третичные отложения впадины Иссык-Куль [9]. В процессе надвигания крыло впадины деформируется с образованием адырных поднятий (форбергов). Деформации сопровождаются интенсивной сейсмической активностью.

Разломы со встречным типом падения плоскостей формируются под влиянием общей причины – субгоризонтального сокращения земной коры Тянь-Шаня в результате схождения Индостанской и Евразийской литосферных плит [13]. Вещественно-структурные процессы приводят к изменению мощности земной коры и литосферы в целом и формированию гор – орогенезу. По при-

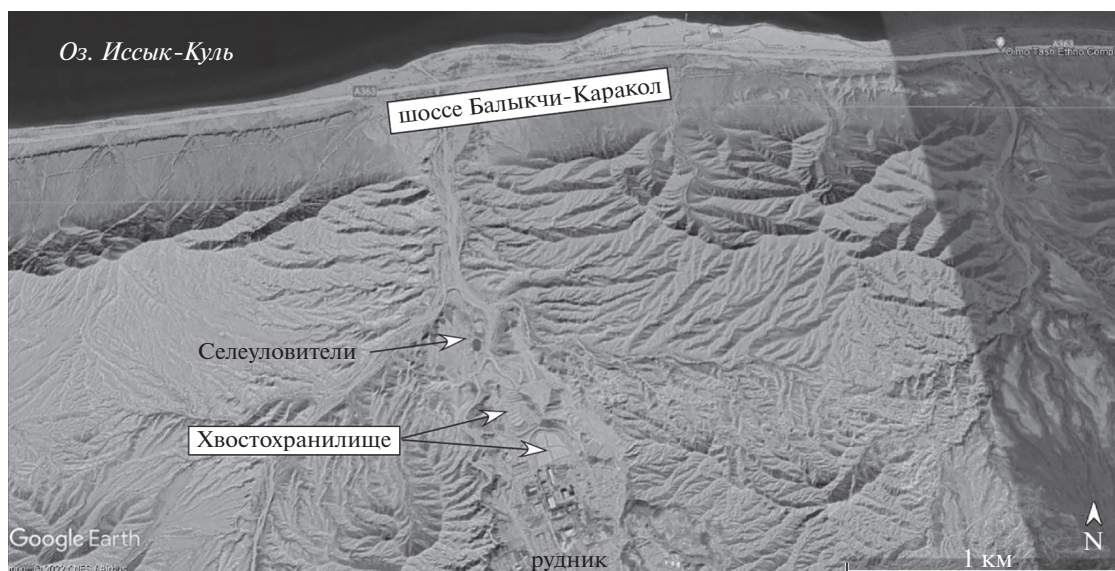


Рис. 7. Отработанный Каджи-Сайский урановый рудник и его радиоактивное хвостохранилище (космический снимок).

чине встречных деформаций, в основном южных и северных румбов, в разломах происходит концентрация напряжений и деформаций, что является причиной появления потенциальных очагов сейсмичности. Разрядка напряжений приводит к землетрясениям, в том числе катастрофического характера. Палеосейсмологические и современные инструментальные исследования показали, что накопление и сейсмогенная разрядка напряжений происходят с определенной цикличностью. В южном Прииссыккулье повторяемость сильных сейсмических событий происходит раз в 200–300 лет.

### ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КАДЖИ-САЙСКОГО УРАНОВОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Отходы добычи урана – это “дамклов меч”, постоянно висящий над жителями Республики Киргизия в районах расположения радиоактивных хвостохранилищ, в том числе и Каджи-Сайского. Большинство этих хранилищ – наследие советских времен – всего лишь огорожены невысокими до 1.5–2.0 м дамбами, а отходы перекрыты небольшим по мощности 0.5–1.0-метровым слоем глины и гравия. Сильная сейсмичность, являющаяся мгновенной и приводящая к образованию разломов-уступов, обвалов скальных пород, оползневых склонов, лавин и селевых потоков, непосредственно угрожает этим площадкам.

Каджи-Сайское урановое хранилище расположено среди адыров с абс. отм. 1607–1896 м в долинах рек Каджи-Саз и Тоссор в 4 км к В-СВ от пос. Каджи-Сай. В геологическом отношении оно приурочено к сопряжению новейшего подня-

тия Терской Ала-Тоо и впадины (котловины) Иссык-Куль (см. рис. 1). Общая площадь, занятая радиоактивными отходами, составляет приблизительно 2 га. Объем отходов – 250 тыс. м<sup>3</sup>. Мощность эффективной дозы облучения 1 мкЗв/ч, радоноразделение 1000 мБк/(м<sup>2</sup>/с) [11]. Зброшенны́е к настоящему времени отходы (отвалы) лежат на неогеновых гравийно-песчаных отложениях аллювиально-пролювиального генезиса иссык-кульской свиты нижне-среднего плиоцена (N<sub>1–2is</sub>) (рис. 7).

Природная устойчивость склонов долин, сложенных иссык-кульской гравийно-песчаной толщей, была нарушена террасированием согласно технологии складирования радиоактивных отходов. Наличие техногенных террас, высота которых около 15 м, и нагрузка отходов на них приводят к гравитационному разваливанию нелитифицированной гравийно-песчаной толщи. Дамбы, окружающие отвалы, подвергаются разрушению в силу временного фактора. Обычно это случается во время относительно несильных землетрясений и обильных атмосферных осадков, которые довершают развал. Установлено, что дождевые и талые воды просачиваются через нарушенное радиоактивное хранилище и растекаются в разных направлениях. Воды, размывающие хвостохранилище, текут не только в селеуловитель, но и мимо него через нарушенные дамбы в направлении оз. Иссык-Куль. В этом аспекте инженерная защита отвалов по своей эффективности и состоянию не отвечают существующей угрозе.

Сооруженные вдоль южного склона оз. Иссык-Куль лавино- и селеуловительные преграды республиканского значения по местоположению



и устойчивости к задержанию ударного потока не соответствуют существующей опасности из-за давности возведения. Площадка радиоактивного хранилища, расположенная в пределах лавино- и селеопасных склонов, включая оползневые, может быть подвержена их негативному воздействию. Большую опасность вызывает большое скопление воды в верховьях саев в пролювиальных отложениях и каменных глетчерах. В случае сильных землетрясений устаревшие лавино- и селеуловительные преграды могут быть разрушены, и грязе- и водокаменные потоки устремятся через хранилище в сторону жилых построек, сельскохозяйственных угодьев и шоссе Балыкчи-Каракол к оз. Иссык-Куль.

Палеосейсмологические исследования показывают, что Каджи-Сайское хвостохранилище радиоактивных отходов может быть подвержено сейсмическому воздействию и опасному влиянию лавинных и селевых потоков. Разрушение уранового хранилища приведет к катастрофическим последствиям — радиоактивному заражению большей территории, включая оз. Иссык-Куль. Восстановление и дезактивация последствий катастрофы потребуют много времени и больших финансовых и трудовых затрат. Существующая геозекологическая угроза требует безотлагательного проведения инженерно-геологических исследований. Их следует направить на комплексную оценку геозекологической безопасности района и разработку современных защитных мероприятий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В плейстосейстовых зонах древних землетрясений выявлены протяженные рвы и уступы, а также значительные скальные обрушения (обвалы, срывы), связанные с сильными землетрясениями. Палеосейсмологическими и археосейсмологическими методами определен возраст сильных сейсмических событий, их магнитуда и повторяемость. Произошедшие события относятся к V–XII вв., магнитуда оценена от  $M \geq 6.8$  (до 7.1) единиц, интенсивность колебаний —  $I_0 \geq IX$  баллов и повторяемость — раз в несколько сот лет. Выявленные сильные землетрясения по сотрясаемости грунтов оказались выше ранее определенных в VIII баллов.

Структурная позиция сильных землетрясений, очаги которых локализуются в верхней части земной коры, связывается с неотектоническими зонами дислокаций, развивающихся в условиях встречных напряжений и деформаций. Глубинные магистральные взбросо-надвиگی имеют южное падение, предгорные поднятия-адыры взбросового типа — северное. Последние локализованы во фронтальной части крупных поднятий, надвигающихся на прогибы, что является причиной их сейсмичности.

Площадка Каджи-Сайского уранового хвостохранилища, расположенная в пределах очагов сильных землетрясений, — источник потенциальной экологической катастрофы в Южно-Прииссыккульском регионе. Известно, что под влиянием сильных землетрясений Тюркское государство (V–VIII вв.) была в значительной степени разрушена, включая политическую, административную и военную структуру. Это позволило племенам калмыков пройти рассматриваемый регион, практически не встречая активного сопротивления. Серия землетрясений в IX–XII вв. поставила “жирный крест” на земледельческой цивилизации Прииссыккуля вообще. В этой связи в исследуемом регионе необходимы систематические палеосейсмологические исследования с учетом современных инструментальных данных в аспекте оценки сейсмической, лавинной, селевой и оползневой безопасности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахматов К.Е., Джанузакоев К.Д., Фролова А.Г., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики (Объяснительная записка). Бишкек: Илим, 2012. 51 с.
2. Биосферная территория Иссык-Куль. Культурно-исторические памятники. Бишкек: Илим, 2002. 80 с.
3. Винник Д.Ф., Лесниченко Н.С., Санарова А.В. Работы на Иссык-Куле. Археологические открытия в 1977 году. М.: Наука, 1978. С. 568–560.
4. Иванов П.П. Материалы по археологии котловины Иссык-Куля // Тр. Института истории АН Кыргызской ССР. Вып. III. Фрунзе: Илим, 1957. С. 65–99.
5. Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобекоев Б.Д., Мелешко А.В. и др. Атлас Землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. 73 с.
6. Корженков А.М., Абдиева С.В., Мажейка Й., Муралиев А.М. и др. О неизвестных сильных голоценовых землетрясениях на юге Иссык-Кульской котловины, Тянь-Шань // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 2. С. 30–40.
7. Корженков А.М., Рогожин Е.А., Шен Ю., Деев Е.В., Абдиева С.В. и др. Палеосейсмологические и археосейсмологические исследования по международным проектам РФФИ // Вестник РФФИ. 2014. № 1 (81). С. 15–20.
8. Корженков А.М., Кольченко В.А., Лужанский Д.В., Абдиева С.В. и др. Археосейсмологические исследования и структурная позиция средневековых землетрясений на юге Иссык-Кульской Впадины (Тянь-Шань) // Физика Земли. 2016. № 2. С. 71–86.
9. Сильные исторические и палеоземлетрясения Прииссыккуля и их положение в структуре Северного Тянь-Шаня. М.: ИФЗ РАН, 2018. 174 с.
10. Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.

11. *Шереметов А.И.* Ликвидация наследия бывших урановых производств в странах СНГ. Ч. 2. Основные технические решения. 2017. [https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=каджи-сайское+хвостохранилище&src=suggest\\_Pers](https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=каджи-сайское+хвостохранилище&src=suggest_Pers)
12. *Чедия О.К., Джумадылова Ч.К., Трунилин С.И.* Предтерсейский краевой разлом в междуречье Джетыюгуз-Тоссор // Известия АН. Кирг. ССР. Физ.-тех. и матем. науки. 1988. № 1. С. 79–88.
13. *Burgette R.J.* Uplift in response to tectonic convergence: The Kyrgyz Tien Shan and Cascadia subduction zone. Ph.D. Thesis. University of Oregon, USA. 2008. 242 p.
14. *Korjenkov A.M., Mazor E.* Seismogenic origin of the ancient Avdat ruins, Negev desert, Israel // *Natural Hazards*. 1999. V. 18. № 3. P. 193–226.
15. *Korzhenkov A.M., Deev E.V.* Underestimated seismic hazard in the south of the Issyk-Kul Lake region (Northern Tien Shan) // *Geodesy and Geodynamics*. 2017. 8 (8). P. 169–180.
16. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1994. V. 84. P. 974–1002.

## PALEOSEISMICITY OF THE SOUTHERN ISSYK-KUL LAKE REGION AND GEOECOLOGICAL PROBLEMS OF THE KADZHI-SAI URANIUM TAILING FACILITY (KYRGYZ REPUBLIC)

**L. A. Korzhenkova<sup>a,#</sup>, A. M. Korzhenkov<sup>b</sup>, and V. M. Makeev<sup>a,##</sup>**

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>b</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya ul., 10, str. 1, Moscow, 123242 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: korjenkova2404@mail.ru*

<sup>##</sup> *E-mail vmakeev@mail.ru*

The research is aimed at studying rare and strong paleoseismicity in the southern Issyk-Kul Lake region using the methods of paleo- and archeoseismology. In the Middle Ages, this region was under the recurrent impact of earthquakes, which could have led to catastrophic consequences, i.e., the destruction of medieval civilizations. These disastrous processes are not excluded now. The research region includes the southern coastal zones of Lake Issyk-Kul with their industrial, residential, economic and other infrastructure. For its safe functioning, knowledge about the mode of earthquakes in the past and in the present is necessary. Paleoseismological studies in the southern Issyk-Kul Lake region permitted us for the first time to identify the centers of strong ancient earthquakes in relief, i.e., the seismic scarps in the immediate vicinity of the Kadzhi-Sai tailing dump. In the isoseismic earthquake areas, significant rock failures were registered: landslides, disruptions and landslides. Based on the radiocarbon dating of samples, the age of these seismic events were determined. Their recurrence as once every several hundred years was calculated, with the magnitude  $M_s \geq 7$  and the seismic intensity  $I_0 \geq IX$ . Structurally, the earthquakes, with their sources being localized in the upper part of the earth's crust, are associated with neotectonic and modern deformation zones. These are deep thrusts of a southern dip and piedmont uplifts-adyrs of a reverse-dip type and a northern dip. The latter are localized in the frontal part of large uplifts moving towards the troughs. The formation of these zones with an opposite type of development is associated with the subhorizontal contraction of the Tien Shan Earth's crust and its orogeny. Matter and structural movements lead to the redistribution of the Earth's crust thickness and the formation of high mountains. Due to counter deformations, stress and strain concentrate in faults to form potential seismic centers, including catastrophic. The territory of the Kadzhi-Sai uranium-tailing dump is under the threat of destruction due to seismic hazard and secondary intense exogenous processes, i.e., landslides and mudflows. Earthquakes, as a rule, cause landslides in semi-hard Neogene rock of the Issyk-Kul suite, on which loose radioactive waste is stored. It has been found that atmospheric precipitation eroding the tailing dump flows not only into the mudflow trap, but also passes it towards Lake Issyk-Kul. The water that has been accumulated behind natural dams on the slopes of ridges may once break through the obstacles holding them and turn into a powerful debris flow. The constructed mudflow traps are not currently adequate to the existing threat in terms of their volume and location. To arrange engineering protection of radioactive waste sites from hazardous processes, it is proposed to conduct additional studies for assessing seismic, landslide and mudflow hazards.

**Keywords:** *paleoseismology, archeoseismology, faults, seismic scarps, landslides and taluses, rockslides, uranium tailings, tortkuls, adyrs, caravanserai*

## REFERENCES

1. Abdrakhmatov, K.Ye., Dzhanuzakov, K.D., Frolova, A.G., Pogrebnoi, V.N. *Karta seismicheskogo raionirovaniya territorii Kyrgyzskoi Respubliki (Ob'yasnitel'naya zapiska)* [Seismic zoning map of the Kyrgyz Republic territory (Explanatory note)]. Bishkek, Ilim Publ., 2012, 51 p. (in Russian)
2. *Biosfernaya territoriya Issyk-Kul'. Kul'turno-istoricheskie pamyatniki* [Issyk-Kul biosphere territory. Cultural and historical monuments]. Bishkek, Ilim Publ., 2002, 80 p. (in Russian)
3. Vinnik, D.F., Lesnichenko, N.S., Sanarova, A.V. *Raboty na Issyk-Kule. Arkheologicheskiye otkrytiya v 1977 godu* [Issyk-Kul studies. Archaeological discoveries in 1977]. Moscow, Nauka Publ., 1978, pp. 568–560. (in Russian)
4. Ivanov, P.P. *Materialy po arkheologii kotloviny Issyk-Kulya* [Data on the Issyk-Kul basin archeology]. *Tr. Instituta istorii AN Kirgizskoi SSR. Vyp. III.* Frunze, Ilim Publ., 1957, pp. 65–99. (in Russian)
5. Kal'met'yeva, Z.A., Mikolaichuk, A.V., Moldobekov, B.D., Meleshko, A.V. et al. *Atlas zemletryaseni Kyrgyzstana* [Atlas of Kyrgyzstan earthquakes]. Bishkek, TSAIIZ Publ., 2009, 73 p. (in Russian)
6. Korzhenkov, A.M., Abdieva, S.V., Mazheika, Y., Muraliev, A.M., et al. *O neizvestnykh sil'nykh golotsenovykh zemletryasenyakh na yuge Issyk-Kul'skoi kotloviny, Tyan'-Shan'* [About unknown strong Holocene earthquakes in the south of Issyk-Kul basin, Tien Shan]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2014, vol. 41, no. 2, pp. 30–40. (in Russian)
7. Korzhenkov, A.M., Rogozhin, Ye.A., Shen, Yu., Deyev, Ye.V., Abdieva, S.V., et al. *Paleoseismologicheskie i arkheo-seismologicheskie issledovaniya po mezhdunarodnym proektam RFFI* [Paleoseismological and archeo-seismological researches under RFBR international projects]. *Vestnik RFFI*, 2014, no. 1 (81), pp. 15–20. (in Russian)
8. Korzhenkov, A.M., Kol'chenko, V.A., Luzhanskii, D.V., Abdiyeva S.V., et al. *Arkheo-seismologicheskie issledovaniya i strukturnaya pozitsiya srednevekovykh zemletryaseni na yuge Issyk-Kul'skoi Vpadiny (Tyan'-Shan')* [Archaeoseismological studies and the structural position of medieval earthquakes in the south of Issyk-Kul depression, Tien Shan.]. *Fizika Zemli*, 2016, no. 2, pp. 71–86. (in Russian)
9. *Sil'nyye istoricheskiye i paleozemletryaseniya Priissyk-kul'ya i ikh polozheniye v strukture Severnogo Tyan'-Shanya* [Strong historical and paleoearthquakes in the Issyk-Kul region and their position in the Northern Tien Shan structure]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2018, 174 p. (in Russian)
10. Strom, A.L., Nikonov, A.A. *Sootnosheniya mezhdu parametrami seismogennykh razryvov i magnitudoi zemletryaseni* [Correlations between the seismogenic ruptures parameters and the earthquakes magnitude]. *Fizika Zemli*, 1997, no. 12, pp. 55–67. (in Russian)
11. Sheremetov, A.I. *Likvidatsiya naslediya byvshikh uranovykh proizvodstv v stranakh SNG. Chast' 2: Osnovnye tekhnicheskie resheniya* [Liquidation of the former uranium production legacy in the CIS countries. Part 2: Basic technical solutions] 2017, [https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=kadzhiayskoye+khvostokhranilishche&src=suggest\\_Pers](https://yandex.ru/search/?lr=20728&text=kadzhiayskoye+khvostokhranilishche&src=suggest_Pers) (in Russian)
12. Chediya, O.K., Dzhumadylova, Ch.K., Trunilin, S.I. *Predterskeiskii kraevoi razlom v mezhdurech'ye Dzhetyoguz-Tossor* [Cis-Terskei marginal fault in the Dzhetyoguz-Tossor interfluve]. *Izvestiya AN Kirg. SSR. Fiz.-tekhn. i matem. nauki*, no. 1, 1988, pp. 79–88. (in Russian)
13. Burgette, R.J. *Uplift in response to tectonic convergence: The Kyrgyz Tien Shan and Cascadia subduction zone.* Ph.D. Thesis. University of Oregon, USA. 2008. 242 p.
14. Korjenkov, A.M., Mazor, E. Seismogenic origin of the ancient Avdat ruins, Negev desert, Israel. *Natural Hazards*, 1999, vol. 18, no. 3, pp. 193–226.
15. Korzhenkov, A.M., Deev, E.V. Underestimated seismic hazard in the south of the Issyk-Kul Lake region (Northern Tien Shan). *Geod. Geodyn.*, 2017, 8 (8), pp. 169–180.
16. Wells, D.L., Coppersmith, K.J. Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994, vol. 84, pp. 974–1002.