

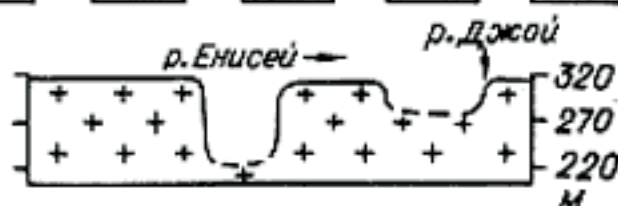
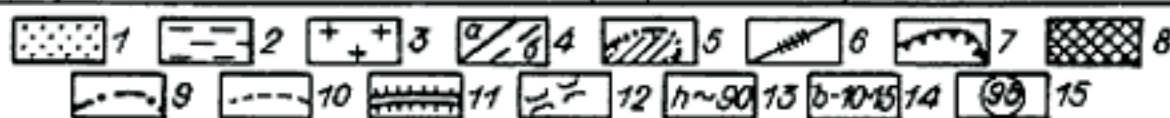
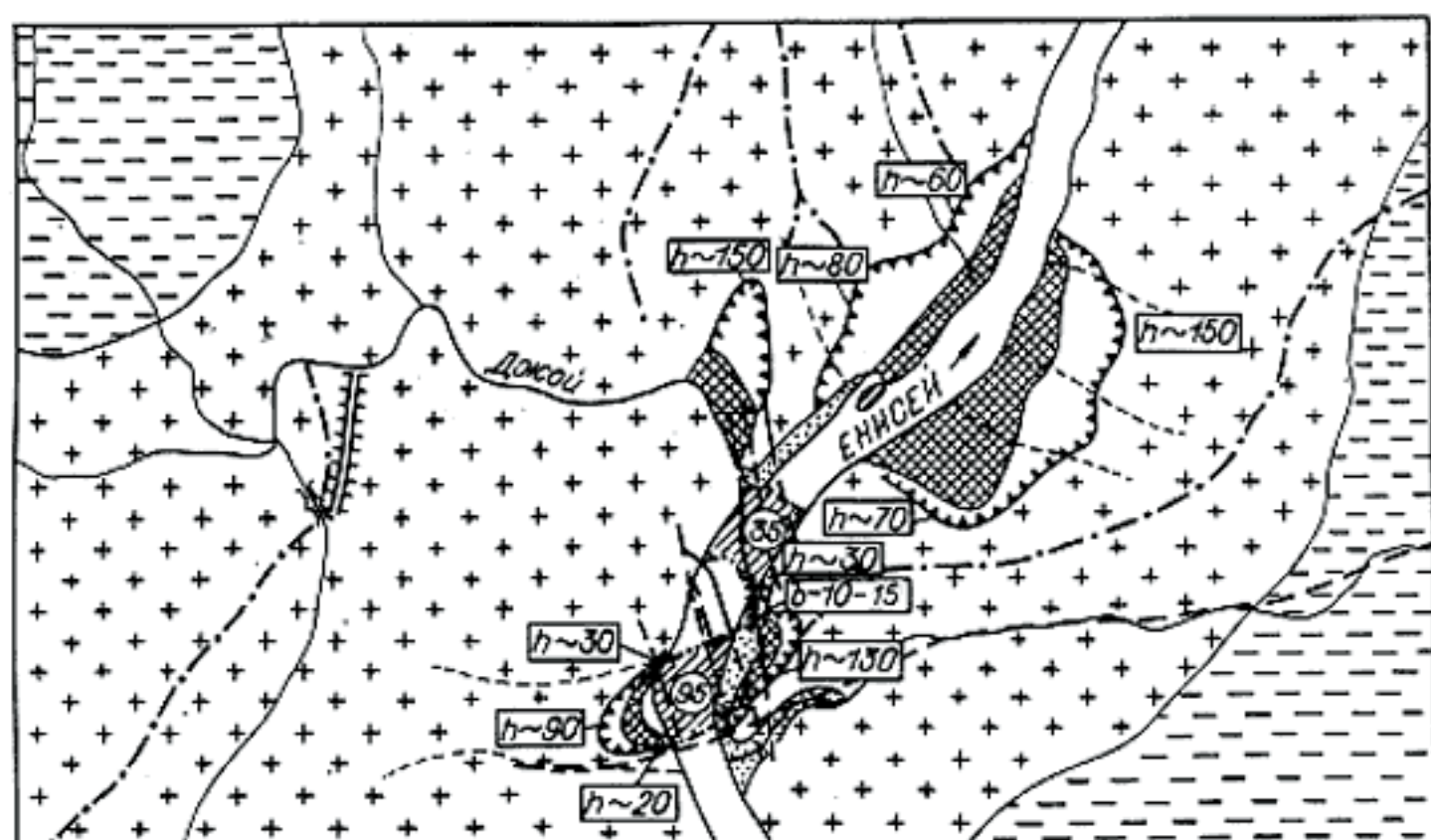
П. Я. ЗЕЛЕНКОВ

О ВОЗМОЖНЫХ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В РАЙОНЕ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Приводятся описание и доказательства сейсмогенного происхождения остаточных деформаций в районе устья р. Джой на Енисее, дается прогноз возможных сейсмогеологических явлений и оценивается сейсмическая опасность участка строительства Саяно-Шушенской ГЭС.

В настоящее время у нас в стране и за рубежом большое внимание уделяется строительству высоких и сверхвысоких плотин арочного типа. К числу таких сооружений относится строящаяся на Енисее Саяно-Шушенская ГЭС. Район строительства основных и вспомогательных сооружений гидроузла, согласно принятым в настоящее время картам сейсмического районирования (СНиП П-А, 12—69), относится к зоне с ожидаемой сотрясаемостью в VII баллов. Комплекс многолетних инженерно-геологических и инструментальных исследований, проведенных «Ленгидропроектом» на участке Карловского створа, позволил сделать вывод, что условия для возведения 240-метровой арочной плотины являются благоприятными как в отношении общей структурно-геоморфологической позиции, так и по всем остальным инженерно-геологическим показателям [13]. Но в 6—7 км выше по течению в районе устья р. Джой геофизическими исследованиями были выявлены два аномальных переуглубления коренного русла Енисея, заполненные аллювием. Причиной их образования явилась скорее всего четвертичная блоковая тектоника [13]. С целью уточнения механизма формирования остаточных деформаций, названных нами структурой Джой, сотрудниками ИЗК СО АН СССР были проведены дополнительные исследования (кроме автора в них принимали участие В. А. Авдеев и А. В. Чилизубов).

Район структуры Джой сложен крупнозернистыми порфировидными гранитами джойского комплекса девона, интенсивно разбитыми трещинами и разномасштабными разрывными нарушениями, пересекающими долину Енисея под углом около 30° (см. рисунок). Наиболее крупное из них проходит прямо через устье р. Джой. На правом берегу на продолжении этой зоны находится расселина шириной около 10—15 м, отчленяющая от коренного склона моноклитный блок пород. Стенки ее вертикальны. В днище пройден шурф глубиной около 9 м, вскрывший аллювиальные отложения и не достигший коренных пород. Наклонное бурение подтвердило наличие здесь разрывного нарушения. Прерывистость керна свидетельствует о сильной раздробленности пород в пределах этой зоны. Для сравнения можно сказать, что милониты в зонах залеченных разломов на участке Карловского створа по своей механической прочности не уступают вмещающим породам.



Геолого-морфологическая схема структуры Джой (сост. с исп. матер. Ленгидропроекта). 1 — современные аллювиальные отложения, слагающие первую надпойменную террасу; 2 — джебашская серия, зеленые метаморфические сланцы с крупными линзами мраморов; 3 — крупнозернистые порфиroidные граниты посленивнедевонского (джойского) интрузивного комплекса; 4 — разрывные нарушения: а — достоверные, б — предполагаемые; 5 — переуглубления коренного ложа Енисея; 6 — гигантские зияющие трещины, приуроченные к зонам тектонических нарушений; 7 — тыловые стенки отрыва сейсмогравитационных смещений; 8 — смещенная обвальная масса; 9 — линии водоразделов; 10 — ложбины временных водотоков; 11 — брошенные долины; 12 — долины прорыва; 13 — высота тыловых стенок отрыва; 14 — ширина зияния открытых трещин, м; 15 — глубина переуглублений коренного ложа Енисея, м. Внизу — продольный профиль скального основания русла Енисея.

Расселина не имеет ничего общего с описанными в литературе трещинами бортового и донного отпоров, разгрузки, отседания, откоса, гравитационными трещинами и т. д. [11, 12 и др.]. Во-первых, ширина ее 10—15 м. Трещины подобной ширины могут встречаться только на высоких обрывистых склонах при образовании столбов отседания, в то время как расселиной отчленен блок на урезе воды. Во-вторых, шурф, пройденный на глубину около 9 м, не достиг коренных пород. Следовательно, трещина имеет более глубокое зияние, нежели уровень коренного скального ложа реки в районе скального выступа между депрессиями. Это, в свою очередь, исключает образование расселины за счет соскальзывания отчлененного блока в русло реки по какой-либо пологой плоскости. При приближении к днищевым частям трещины разгрузки, как правило, уменьшаются до нескольких сантиметров, реже до десятков сантиметров. В данном случае даже на уровне скального днища реки ширина зияния расселины составляет несколько метров.

Нижняя по течению депрессия имеет глубину погружения скального основания в центральной части около 35—36 м, при приближении к берегам она уменьшается до 25—28 м. Ширина вдоль реки около 500 м. Ширина депрессии, расположенной выше по течению, достигает 450 м. По данным вертикального зондирования глубина ее около 96 м. Для проверки на правом берегу Енисея были заложены две скважины. Одна из них была пройдена на глубину около 70 м, вторая — на 35,8 м, и обе они не дошли до коренного ложа реки. Ими были вскрыты несорти-

рованные гравийно-галечные аллювиальные отложения с песчаным и супесчаным заполнителем. Депрессии разделены выступом скальных пород шириной 450—500 м.

Переуглубления коренного ложа отмечаются и на других реках. Так, например, они зафиксированы на Ангаре ниже Падунского, Пьяного и других порогов [10]. Там их формирование связано с вымыванием более мягких пород потоками воды, падающими с порогов. Отдельные переуглубления наблюдаются на Енисее и выше описываемой структуры [5]. Но длинная ось переуглублений во всех случаях в несколько раз превышает короткую и располагается по течению реки. В устье р. Джой мы имеем совершенно другой тип переуглубления. При ширине реки около 300 м ширина верхней депрессии всего 450 м, в то время как по длинной оси, расположенной вкрест течения реки, она достигает 1,5 км. Кроме того, ниже устья располагается порог, подпирающий течение реки, что препятствует развитию эрозионной деятельности. Для возникновения мощных турбулентных поперечных потоков в реке необходимо изменение простираания русла хотя бы на 90° , а в данном случае плавный изгиб составляет всего $35-40^\circ$.

Таким образом, перечисленные выше факторы исключают возможный эрозионный генезис переуглублений.

В береговых частях верхней депрессии в бортах долины отмечаются мощные циркообразные стенки отрыва. Высота правобережной стенки достигает 100—130 м, длина около 500 м. Она состоит из серии ступенчатых уступов высотой до 25—30 м. Высота стенки отрыва левобережного цирка достигает 90 м при длине около 500—600 м. Днища цирков покрыты крупноглыбовой россыпью. В стенках отрыва наблюдаются маломощные зоны дробления пород, которые облегчили формирование смещений [19].

Отличительной чертой описанных «обвалов», оставшейся незамеченной при обследовании этого района другими исследователями, является явный дефицит обвальной массы. Предполагать перенос материала потоками воды Енисея нельзя, поскольку в этом месте скорость течения ниже средней. В то же время в районе Большепорожского обвала, размеры и время образования которого сопоставимы с Джойскими, русло реки с 250—300 м зажато до 70—80 м и скорость реки достигает в паводки 45 км/ч, но обвальная масса почти полностью осталась на местах.

Рыхлые террасовые отложения, наблюдаемые в береговых выемках, образованных цирками, прислонены к стенкам отрыва и остаткам обвальной массы. В районе тылового шва они частично перекрыты спускающейся глыбовой россыпью. Высота террас около 5 м над урезом воды.

Большеобъемные склоновые смещения, захватившие коренные породы, наблюдаются и ниже устья Джоя (см. рисунок).

По данным повторного нивелирования, признаки дифференцированных тектонических движений в этом районе отсутствуют. Прислоненные к обвальной массе речные отложения не деформированы [13].

Если судить по морфологической свежести и степени сохранности стенок отрыва и других выступающих форм как в верхней, наиболее поднятой над рекой части, так и у самого уреза воды, то время образования структуры можно условно определить в последние сотни-тысячу лет. Таким образом, мы можем легко рассчитать скорость медленных вертикальных тектонических движений, если таковые принять за доминирующие при формировании всех описанных выше форм. Она составит как минимум 70—90 мм/год. Подобные скорости медленных тектонических движений не зарегистрированы даже в зонах самых активных разломов, не говоря уже о перемещении столь небольших по размерам блоков.

Все поле остаточных деформаций структуры располагается в сложном тектоническом узле. Между блоками Джойского и Борусского хребтов, воздымающихся более чем на 500 м над окружающими горами, располагаются синклинальный прогиб, к которому приурочены долины рек Джой и Джойская Сосновка. Подобный же синклинальный прогиб, но более узкий, приурочен к долине Енисея [8], что подтверждается наличием здесь остатков кор выветривания, которые способны сохраниться только в областях, не испытавших интенсивные тектонические перемещения [14]. В 7 км к юго-востоку проходит зона глубинного Усть-Кантегирского разлома с обширной сетью оперяющих более мелких нарушений. Кроме того, ни у кого из исследователей, изучавших остаточные деформации в этом районе, не вызывает сомнений взаимосвязь возникновения депрессий и береговых цирков.

Учитывая перечисленные выше данные, можно сделать обоснованное, на наш взгляд, предположение. Весь комплекс описанных явлений мог образоваться только при резком дифференцированном опускании тектонических клиньев, сопровождавшем сейсмический удар, во время которого были раскрыты части разломов, ограничивающих блоки пород в долине Енисея. Отголоски землетрясения получили свое выражение в виде перехвата первого от устья притока р. Джой. Ручей, не доходя примерно 1 км до р. Джой, резко свернул в сторону, оставив хорошо разработанную долину, и пересек водораздел, отделяющий его от реки. Это, возможно, связано с обновлением или пассивным вскрытием ослабленной зоны, по простиранию переходящей в долину левобережного притока Джоя (см. рисунок).

Отсутствие современных тектонических движений и зарегистрированных эпицентров слабых землетрясений объясняется особенностями сейсмического режима многих сейсмоактивных областей, испытавших сильнейшие потрясения. После мощнейшей разрядки тектонических напряжений при сильных и катастрофических землетрясениях наступает период спада сейсмической деятельности, соответствующий накоплению новой порции сейсмической энергии [18]. Подобная картина наблюдается и в пределах Западного Саяна, где наряду с малым количеством слабых толчков происходят землетрясения с $M=5^{1/4}-5^{3/4}$.

В литературе уже имеется описание подобных структур, относящихся к категории гравитационно-сеймотектонических. Это структуры Рита, Шартлай в Прибайкалье [15], структура Битут в Гобийском Алтае, образованная при Гоби-Алтайском землетрясении 4. XII. 1957 г. [1]. Они имеют гораздо большие масштабы проявления и фиксируют эпицентральные области сильнейших землетрясений с интенсивностью более X баллов ($M > 7,5$). Как правило, указанные структуры располагаются на склонах высоких хребтов, и это вызывает сомнения у некоторых исследователей в правдоподобности объяснения механизма их образования. Структура Джой является несомненным доказательством возможности образования сеймотектонических клиньев, поскольку ее геоморфологическая позиция отменяет главный аргумент противников гравитационно-сеймотектонического происхождения некоторых структур — возникновение их за счет гигантских сейсмогравитационных сбросо-обвалов. Приуроченность гравитационно-сеймотектонических клиньев к тальвегу долины Енисея исключает возможность образования ее за счет сейсмогравитации или, как было показано выше, за счет каких-либо экзогенных процессов.

Необычность указанных деформаций ставит нас в затруднительное положение при определении интенсивности землетрясения. Но учитывая площадь сплошного развития склоновых смещений (2×4 км), амплитуду погружения днища депрессий и сравнивая их с другими гравитационно-сеймотектоническими структурами, мы можем оценить интенсивность землетрясения как минимум в IX баллов ($M=6,5-7$). На воз-

возможность подобных сотрясений указывает также и наличие сейсмогенных структур в других районах Западного Саяна [4].

Несмотря на благоприятные в целом условия строительства Саяно-Шушенской ГЭС (на участке Карловского створа), мы считаем необходимым обратить внимание на следующие факты.

Минимальное значение радиусов IX-балльных изосейст при землетрясениях с $M=6,5-7$ ($I_0=IX$ баллов) в Байкальской рифтовой зоне составляет как минимум 7,5 км [15]. Учитывая, что глубины очагов землетрясений в Байкальской зоне и Алтае-Саянской складчатой области сопоставимы [3, 15], а механические свойства слагающих пород почти идентичны, мы можем принять это значение и для определения фоновой сейсмичности на участке строительства Саяно-Шушенской ГЭС. Следовательно, сила максимального возможного фонового сотрясения в районе строительства может достигать IX баллов при повторении IX-балльного землетрясения в районе структуры Джой.

На возможность повторения подобного сотрясения указывает общее перенапряженное состояние пород. Природа напряжений тектоническая [6]. В отдельных точках массива породы находятся в условиях растяжения, что проявляется в разуплотнении массива, раскрытии трещин. О продолжающемся накапливании энергии свидетельствуют и медленные перемещения по зонам тектонических нарушений, проходящим под телом плотины. Скорость перемещения крыльев разрывов составляет 3—12 микрон в год. При критической скорости тектонической ползучести в 100 микрон в год она не представляет опасности [13], но при мощной сейсмической разрядке возможно резкое увеличение скорости перемещения крыльев разрыва, что может привести к нарушению монолитности фундамента и плотины.

Расчеты, проведенные А. В. Ладыным и С. А. Тычковым [7] для Саяно-Шушенской ГЭС, показали, что максимальное возможное землетрясение, вызванное влиянием плотины и водохранилища, не превысит $K=11$. Однако, как показывает опыт, подобные прогнозы вызванной сейсмичности не всегда оправдываются. Так, например, после заполнения Нурекского водохранилища на р. Вахш до отметки 140 м сейсмическая активность возросла в 10—12 раз [9].

Мы не будем останавливаться на проблеме «возбужденной» сейсмичности, поскольку ей уделено уже довольно много внимания. Отметим только, что часто землетрясения после заполнения водохранилищ возникают в районах, которые раньше считались либо вообще асейсмичными, либо относились к слабосейсмичным. Но проведенные после сильных сейсмических толчков дополнительные исследования позволяли выявлять летописные или геологические признаки землетрясений, которые не были учтены ранее, при проектировании плотин. Примером тому может служить плотина Койна в Индии [2].

Большую опасность представляют возможные сейсмогравитационные смещения. Уже давно отмечена высокая повторяемость склоновых гравитационных и сейсмогравитационных смещений в районах развития остаточных деформаций земной коры. Часто они происходят без видимых на то причин, т. е. на сухих необводненных склонах с наклоном меньше угла естественного откоса и сложенных крепкими породами. Подобные явления можно объяснить только общим перенапряжением горных массивов. Примером тому может служить структура Давочан в Становом нагорье [16, 17]. Развитие подобных процессов следует ожидать и в районе Саяно-Шушенской ГЭС. Распор бортов долины Енисея наряду с прогибанием днища водохранилища может привести к дополнительному раскрытию трещин. Смачивание плоскостей трещин еще больше увеличит опасность соскальзывания большеобъемных блоков пород в водохранилище, что может привести к образованию паводковой волны.

Общее перенапряженное состояние пород, слагающих склоны, уже само по себе может вызвать смещение в процессе строительства при зачистке котлована и бортов долины в местах примыкания крыльев плотины, подобно тому как происходит образования трещин разгрузки при выработке котлованов [11]. При землетрясениях опасность подобных процессов резко возрастает.

Подводя итог изложенному, мы можем констатировать: условия строительства плотины Саяно-Шушенской ГЭС не столь уж благоприятны, как это следовало из отчетов по инженерно-геологическим и сейсмологическим исследованиям. Наибольшую опасность представляет близость гравитационно-сейсмотектонической структуры Джой, фиксирующей эпицентральною область IX-балльного землетрясения. На возможность повторения подобного сотрясения в этом районе указывает общее перенапряженное состояние пород, сложность структурно-геологической обстановки, будущее влияние возводимой плотины и водохранилища, возможность возникновения большеобъемных склоновых гравитационных и сейсмогравитационных смещений, способных вызвать паводковую волну.

Некоторые из приводимых здесь положений не являются бесспорными, но, учитывая сложность и уникальность возводимого сооружения, крайне необходимо провести дальнейшие тщательные сейсмогеологические исследования с привлечением геофизики и тяжелой разведки. Недооценка возможности проявления сильных землетрясений в районе ГЭС может привести к тяжелым последствиям не только для строящегося гидроузла, но и для лежащих ниже населенных пунктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоби-Алтайское землетрясение. Изд-во АН СССР, 1963.
2. Губин И. Е. Землетрясение Койна. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1970, № 6.
3. Жалковский Н. Д., Мучная В. И. Распределение землетрясений по энергии и сейсмическая активность Алтае-Саянской области. В сб. Сейсмичность Алтае-Саянской области. Новосибирск, 1975.
4. Зеленков П. Я., Авдеев В. А., Чипизубов А. В. Сейсмогенные структуры Западного Саяна. Тез. докл. VII конф. мол. научн. сотр. по геол. и геофиз. Вост. Сибири. Иркутск, 1976.
5. Зяткова Л. К., Москвин В. И. Применение комплексных структурно-геоморфологических исследований при изучении новейших тектонических движений в Западном Саяне. В кн. Структурно-геоморфологические исследования в Сибири. Новосибирск, «Наука», 1970.
6. Кутелов В. М. Закономерности в распространении естественных напряжений в массиве скальных трещиноватых пород склонов речных долин. В кн. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). «Наука», 1973.
7. Ладынин А. В., Тычков С. А. Напряженное состояние земной коры под нагрузкой рельефа и водохранилища (к проблеме «возбужденной» сейсмичности в пределах крупных гидротехнических сооружений). В кн. Методич. вопр. исслед. современных движений земной коры. Новосибирск, 1975.
8. Москвин В. И. К методике построения карты амплитуд новейших тектонических движений в Западном Саяне. В кн. Структурно-геол. исслед. в Сибири. Вып. 1. Новосибирск, 1970.
9. Николаев Н. И. Усиление региональной и локальной сейсмичности, связанное с заполнением водохранилищ. В кн. Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. № 5, изд-во МГУ, 1973.
10. Пальшин Г. Б. Инженерно-геологические свойства пород. В кн. Братское водохранилище. Инж. геол. территории. Изд-во АН СССР, 1963.
11. Прочухан Д. П. Образование трещин бортового отпора в скальных породах, вызванное проходкой строительного котлована. Инф. сб. Ленинграда, № 18. 1960.
12. Прочухан Д. П. Трещины разгрузки в скальных основаниях высоких плотин. Сов. геол., 1964, № 7.
13. Прочухан Д. П., Пирогов И. А., Бадухин В. Н. Инженерно-геологические условия плотины Саянской ГЭС. Тр. «Гидропроекта», Ленингр. вып., № 27 (14). Л., «Энергия», 1972.
14. Растворова В. А., Добродеев О. П. О закономерностях распространения древней коры выветривания на территории Южно-Минусинской впадины и ее гор-

- ного обрамления. В кн. Пробл. геоморфологии и неотектоники орогенных областей Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, «Наука», 1968.
15. Сейсмоструктура и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. Под ред. В. П. Солоненко. «Наука», 1968.
 16. Солоненко В. П. Разрушение горных склонов при землетрясениях. В кн. Сейсмология и сейсмогеология. Иркутск, 1972.
 17. Солоненко В. П. Сейсмогенное разрушение горных склонов при землетрясениях. В кн. Гидрогеология и инж. геология (Межд. геол. конгр. XXIV сес. Докл. сов. геол. Секция № 11 и 13. Симпозиум № 1). «Наука», 1972.
 18. Солоненко В. П. Палеосейсмология. Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1973, № 9.
 19. Финаров Д. П. Оползни и обвалы в долине р. Енисей и прогноз их развития после наполнения Саяно-Шушенского водохранилища. Тр. Координац. совещ. по гидротехн. Проектирование и эксплуатация водохранилищ. Вып. 59. Л., «Энергия», 1970.

ИЗК СО АН СССР
Иркутск

Поступила в редакцию
9 июля 1976 г.

P. Ya. Zelenkov

ON POSSIBLE SEISMOGEOLOGIC PHENOMENA IN THE AREA
OF SAYAN-SHUSHENSKAYA GES

The description and the proofs are given of the seismic origin of residual deformations in the area of the mouth of the river Zhoi, tributary of Yenisei with possible seismogeologic phenomena related with lack of security of the area occupied by the construction work of Sayan-Shushenskaya GES.
