

УДК. 551.34

## ПРОБЛЕМА НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

*Т.А. Таилыкова<sup>1</sup>, А.В. Викулин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт земной коры СО РАН, Иркутск;*

*e-mail: [ta1964@mail.ru](mailto:ta1964@mail.ru)*

<sup>2</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,*

*Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [vik@kscnet.ru](mailto:vik@kscnet.ru)*

Во второй половине XX века в мире резко возросло количество возводимых высоких плотин с образованием крупных водохранилищ. Было замечено, что на прилегающих к водохранилищам территориях увеличилось количество регистрируемых землетрясений, природу возникновения которых было сложно установить. Во второй половине XX века в мире резко возросло количество возводимых высоких плотин с наполнением при них крупных водохранилищ. Было замечено, что на прилегающих территориях увеличивается число регистрируемых землетрясений, природу возникновения которых было сложно установить. Разрушительное землетрясение 10.12.1967 г. в районе плотины Койна, Индия, послужило причиной для начала детального изучения нового процесса. Проанализированы материалы по землетрясениям в районах созданных водохранилищ по зарубежным источникам (от середины прошлого столетия по настоящее время), в которых установлена связь уровня воды с землетрясениями на прилегающих территориях. Проведены исследования на предмет возникновения наведенных/техногенных землетрясений от эксплуатации ангарских глубоководных водохранилищ, где выявлена связь между уровнем воды и происходящими землетрясениями.

### Введение

С увеличением числа создаваемых водохранилищ (особенно больших и средних) во второй половине XX века, появились материалы, позволяющие предположить, что образование некоторых из них инициировало сейсмический процесс на прилегающей территории. Первые сильные сейсмические толчки в районах образованных новых водохранилищ не привлекали особого внимания исследователей и считались фоновыми. Однако со временем исследователи все чаще стали отмечать их концентрацию именно в районах вновь созданных водохранилищ, и данное явление уже не могло рассматриваться как случайное [4, 12]. Со временем по мере изучения наведенной сейсмичности при строительстве крупных плотин, а также при добыче нефти, газа, при закачке воды в скважины накопился большой объем инструментальных данных. В соответствии с [9]: «Официальная» российская (советская) сейсмология довольно долго (в течение 20-30 лет) вообще не признавала явление техногенной (наведенной) сейсмичности. Некоторые сейсмологи, признавая ее, относились к ней как к некоему побочному явлению (сейсмичности «второго сорта»), которое только мешает изучать «настоящую» сейсмичность в полной мере».

В середине XX века началось освоение природных ресурсов Восточной Сибири с активным развитием экономики края и перемещения из центра страны ряда энергоемких отраслей

промышленности, так как в Восточной Сибири наблюдалось благоприятное сочетание природных условий для развития производства и экономики края на базе недорогой в то время электроэнергии. Был создан каскад объемных водохранилищ на р. Ангара, впоследствии ставший одним из крупнейших в мире. За время его эксплуатации на прилегающей к каскаду территории стали регистрироваться землетрясения, природа которых остается непонятной.

### **Характеристика глубоководных ангарских водохранилищ**

Одним из ведущих факторов изменения природной среды служат наполняемые водохранилища, которые необходимы человеку в процессе его жизнедеятельности. Создаваемые на разных территориях, в разных регионах и климатических зонах они могут быть многоцелевыми и иметь несколько разных типов назначений. Среди них выделяются водохранилища энергетического назначения, эксплуатация которых приводит к специфическому активному техногенному воздействию на верхний слой земной коры, ранее не осуществляемому и потому своевременно не оцененному.

Образованные путем перекрытия р. Ангары высоконапорными плотинами Братское и Усть-Илимское водохранилища, а теперь и Богучанское, принадлежат к крупнейшим глубоководным водохранилищам мира, расположенным последовательно в цепочке каскада. Так, Братское водохранилище занимает второе место в мире среди всех антропогенных водоемов, водный объем которого равен  $169,3 \text{ км}^3$  на занимаемой площади в  $5470 \text{ км}^2$  [14]. Примыкающее с севера Усть-Илимское водохранилище – в три раза меньше по площади и по объему Братского. В настоящее время завершается наполнение IV ступени ангарского каскада – Богучанского водохранилища, которое по водному объему на  $1,2 \text{ км}^3$  будет меньше Усть-Илимского, а по площади водного зеркала – на  $450 \text{ км}^2$  наоборот, больше.

### **Точки зрения на природу наведенной сейсмичности**

С наполнением глубоководных Братского и Усть-Илимского водохранилищ, нарушилась геодинамическая обстановка территории Средней Ангары. Местные жители все чаще стали слышать гул из-под земли в районе наполняющегося Братского водохранилища. За период 1968-2009 гг. Байкальским филиалом геофизической службы СО РАН зарегистрировано около 150 землетрясений разных энергетических классов ( $K = 7-13,3$ ). Однако убедительных фактов в пользу появления в районе наведенной сейсмичности до настоящего времени нет, несмотря на регистрацию нескольких достаточно крупных землетрясений с энергетическим классом  $K > 10$ . На природу возникновения таких землетрясений существует две точки зрения: тектоническое происхождение и промышленные взрывы [6, 8, 17]. По результатам изучения зарегистрированных землетрясений на Средней Ангаре (включая крупное Окинское 26.02.1996 г.) был сделан вывод «об отсутствии в районах ангарских водохранилищ каких-либо признаков проявлений наведенной сейсмичности» [5, с. 68].

### Результаты наших исследований

В результате проведенных Т.А. Ташлыковой [19-22, 28] исследований формирования наведенной сейсмичности на Средней Ангаре был детально изучен уровенный режим созданных ангарских водохранилищ в сезонном и многолетнем срезе времени, проанализированы режимы эксплуатации по определенным периодам, оценена боковая приточность водоемов, исследована геология территории. Все эти данные были проанализированы и сопоставлены с характеристиками произошедших землетрясений на прилегающих территориях, в результате получены, на наш взгляд, интересные выводы, указывающие в пользу точки зрения – наведенной сейсмичности.

Проанализировав представленные материалы [18], были найдены аргументы в пользу техногенной природы самого сильного за все время наблюдений землетрясения 17.1.2014 г. в 16.01:26 с  $K = 13,3$ . В частности, отмечается, что имели место «в очаге сдвиговые смещения, сопровождавшиеся небольшой сбросовой компонентой...» [18, с. 265]. По нашему мнению, этот факт, как и ряд других, с учетом зимней сработки водохранилища, выступает одними из важных аргументов в пользу того, что такие землетрясения являются «наведенными» в результате создания водохранилищ.

Дальнейший анализ полученного материала позволил выяснить следующий очень интересный результат: в уровенном режиме Братского водохранилища выделяется 0,5-метровый интервал на уровне 398-399 м, являющийся, по сути, критическим для инициации сейсмической активности. В этот интервал попал ряд землетрясений с разными  $K$ , и самое важное – в этот ряд попали все последние крупные землетрясения 26.02.1996, 9.08.2002 и 15.12.2005. Таким образом, обнаруженный нами в ходе исследования важный аргумент подтверждает техногенный характер и появившихся землетрясений и развития процесса наведенной сейсмичности на Средней Ангаре в результате создания водохранилищ.

Для Братского водохранилища Т.А. Ташлыковой определен интервал в эксплуатационных значениях, являющийся критическим для инициации сейсмической активности, куда попали все последние крупные землетрясения, что, на наш взгляд, только подтверждает их техногенную природу – наведенную сейсмичность. Установлено, что гидродинамическая нагрузка в совокупности с геологическими условиями выступает одним из важных факторов, запускающих механизм наведения землетрясений в результате создания водохранилищ.

### Современные факты наведенной сейсмичности по зарубежным источникам

В Индии по данным [24] насчитывается восемь водохранилищ (Койна, Варна, Bhatsa, Dhamni и др.), в районе которых установлено существование наведенной сейсмичности. Случай наведенной сейсмичности отмечен на водохранилище Govind Ballav Pant (Центральная Индия), вторым по величине водоеме Индии. Отмечается хорошая корреляция между временным изменением уровня воды и сейсмичности (с запаздыванием около месяца), что означает, что водохранилище генерирует землетрясения [23]. Наблюдения на водохранилище Насер (Египет) показали увеличение количества микроземлетрясений после его наполнения,

многие из которых произошли в непосредственной близости от водоема. Примененный метод кросс-корреляции дает представление о существующей тесной связи между уровнем воды и сейсмичностью периода 1982–1985 гг., слабее за период 1992–1998 гг. По мнению исследователей «недавняя сейсмическая активность вокруг водохранилища – случай индуцированной сейсмичности» [27]. Результаты исследования сейсмичности в районе водохранилища Тарбела (Пакистан) показывают, что сейсмичность в радиусе 20 км коррелирует с уровнем воды; активные периоды происходят примерно спустя 250 дней после появления низкого уровня воды. Согласно недавно проведенному исследованию [25], сейсмичность в районе Тарбела становится активной, когда уровень воды снижается. Этот полученный при исследовании результат согласуется и с выводами ученых по водохранилищу Насер [27]. До создания водохранилища Danyiangkou (Центральный Китай) отмечались очень низкие уровни естественной сейсмической активности. С началом наполнения водоема в 1967 г. на прилегающей территории частота и интенсивность сейсмичности сначала увеличились после разрушительного землетрясения 29 ноября 1973,  $M=4,7$ , а потом снизились [26].

Для изучения поведения сейсмичности во времени, авторы проанализировали историю заполнения водоемов за 20-летний период (с 1967 по 1987 гг.) и установили, что землетрясения произошли вскоре после того как уровень водохранилищ стал превышать самое высокое положение предыдущего сезона. Таким образом, рост «максимальных величин землетрясений был непосредственно коррелируемым с увеличением максимальных уровней водохранилищ» [26].

### **Промежуточные выводы**

Приведенные данные показывают, что некоторые исследователи полагают, что при землетрясениях в районах созданных водохранилищ высвобождаются тектонические напряжения, накопленные в геосреде до вмешательства человека. Инженерной деятельности отводится роль спускового механизма (триггера) для высвобождения накопленной энергии. Следствием такой позиции является вывод о том, что энергия наведенного землетрясения не может превышать энергию природных тектонических землетрясений, обусловленных естественными тектоническими процессами в данной области.

Согласно имеющимся представлениям, наиболее вероятными причинами наведенных землетрясений могут быть несколько факторов. Предполагается, что проникновение воды по трещинам в породы может вызвать снижение прочности их свойств за счет физико-химических процессов. Есть данные о снижении внутреннего трения на 15 % при обводнении трещин с глинистым наполнителем и о понижении сколовой прочности на 50%. Причинами техногенных толчков также могут быть неустойчивая гидродинамическая конвекция трещинных вод или изменение поля термоупругих напряжений [7, с. 14]. Главным фактором в ряду «стимуляторов» разрядки напряжений и генерации наведенных землетрясений большинство специалистов считает механическую причину, так как упругие напряжения имеют тенденцию увеличиваться с ростом глубины водохранилища.

### Заключение

К оценке природы наведенной сейсмичности по-новому можно подойти с позиций ротационной модели геодинамического процесс. В основе модели заложены представления о блоковом строении земной коры, которая тектонически перемещается по поверхности вращающейся Земли [1-3].

Как известно, угловая скорость  $\Omega$ , с которой вращается в данный момент времени жестко связанная с телом (Землей) система координат, не зависит от этой системы. Каждый элемент земной коры и/или блок независимо от его размера можно характеризовать одним и тем же моментом импульса  $\mathbf{M}$ , направленным параллельно оси вращения Земли:  $\mathbf{M} = I\Omega$ . Здесь  $I$  – момент инерции блока, который для простоты стаем шаровым. Движение земной коры вдоль поверхности Земли приводит к изменению направления момента импульса блока, что в соответствии с законом его сохранения приводит к появлению момента силы  $\mathbf{K}$ , прикладываемому к блоку со стороны окружающей его среды – земной коры. Важно, что в рамках такой ротационной «кусковатой» [15] постановки задачи упругие напряжения с моментом силы  $\mathbf{K}$  прикладываются к блоку через его поверхность со стороны окружающей его среды – земной коры. Именно напряжения с моментом силы, прикладываемые к блоку земной коры, и определяют природу сейсмическуго момента землетрясения с очагов в этом блоке [3].

«Внутренний» [10], или собственный [16] момент  $\mathbf{M}$  обладает специфическим для геодинамики свойством: он не может в силу закона сохранения момента исчезнуть, в том числе и за счет пластической деформации земной коры. Поэтому ротационные напряжения с моментом силы в результате трансляционного движения блока будут в земной коре накапливаться [2], чем и можно объяснить такое известное свойство геосреды, как ее энергонасыщенность [11]. По-видимому, со свойством энергонасыщенности геологической среды может быть связано и явление сейсмической эмиссии, присущей Земле в широком диапазоне глубин и во всем разнообразии геологических и тектонических условий [13].

Именно возможность объяснения свойства энергонасыщенности геосреды и позволяет в рамках ротационной модели по-новому подойти к изцчению природы наведенной сейсмичности, возникающей в районах водохранилищ и эксплуатируемых месторождений нефти и газа. Действительно, в рамках ротационной модели появление наведенной сейсмичности является не результатом генерации «новых» напряжений, вызванных вмешательством человека в геологическую среду. Появление наведенной сейсмичности, по сути, может являться перераспределением накопленных за протяженный геологический период напряжений в блоковой земной коре в результате ее тектонического движения и связанной с этим процессом сейсмической эмиссией.

### Список литературы

1. Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 559–570.

2. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2013. № 3. С. 67–84.
3. Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г., Герус А.И., Долгая А.А. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016, Т. 58. Вып. 3. С. 547–557.
4. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 368 с.
5. Голенецкий С.И. Землетрясения юга Сибирской платформы по инструментальным сейсмологическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 68–77.
6. Голенецкий С.И. Редкое землетрясение на юге Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 1998. Т. 363, № 3. С. 392–395.
7. Кузин И.П., Калинин Н.И. Особенности сейсмичности в зоне водохранилища Ингури ГЭС в связи с его заполнением // Геологогеофизические исследования в районе Ингури ГЭС. Тбилиси: Мецниереба, 1981. 213 с.
8. Павленов В.А. Проблемы сейсмической безопасности каскада ГЭС на р. Ангаре // Исток. Водохозяйственная газета. 1999. № 4–5. С. 10–11.
9. Панфилов В.С. Техногенная сейсмичность в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. 2008. № 4. С. 60–64.
10. Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. Геологическая. 1961. № 3. С. 36–54.
11. Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука 2008. 379 с.
12. Природные опасности России. Т. 2. Сейсмические опасности. М: «КРУК», 2000. 296 с.
13. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 11. С. 72–77.
14. Савельев В.А. Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири. Новосибирск: Наука, 2000. 200 с.
15. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // Докл. АН СССР. 1979. № 4. С. 829–832.
16. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 2. М.: Наука, 1973. 584 с.
17. Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б. Сейсмичность юга Сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис // Физика Земли. 2007. № 9. С. 18–30.
18. Середкина А.И., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Радзиминович Я.Б. Геолого-геофизические предпосылки формирования очага землетрясения 14 января 2014 г. на Сибирской платформе // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 12. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014. С. 264–266.
19. Ташлыкова Т.А. Индуцированные землетрясения в районе Братского водохранилища // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Т.2. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 331–334.
20. Ташлыкова Т.А. Наведенная сейсмичность Ангарского каскада: миф или реальность? // IX Российско-Монгольская конф по астрономии и геофизике. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. С. 24.
21. Ташлыкова Т.А. Триггерные эффекты активизации сейсмичности при заполнении и эксплуатации водохранилищ Ангарского каскада // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 97–98.

22. *Tashlykova T.A.* Экологическая опасность, возникшая с созданием некоторых крупных водохранилищ // «Экологический риск и экологическая безопасность». Иркутск: Изд-во ИГ, 2012. С. 265-267.
23. *Gahalaut K., V.K. Gahalaut and M.R. Pandey.* A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), central India. *Tectonophysics.* 2007. V. 439. N (1-4). P. 171-178.
24. *Gupta H.K.* A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Sci. Rev.* 2002. V. 58. P. 279–310.
25. *Imoto, M.* Point process modeling of reservoir induced seismicity. *Journal of Applied Probability.* 2001. V.38A.
26. *Liu S., Xu L., and Talwani P.* Reservoir-induced seismicity in Danjiangkou Reservoir: a quantitative analysis. *Geophys. J. Int.* 2011. V. 185. P. 514-528.
27. *Selim, M. M., M. Imoto, and N. Hurokawa.* 2002, Statistical investigation of reservoir-induced seismicity in Aswan area, Egypt. *Earth, Planetary Space.* 2002. V. 54. P. 349-356.
28. *Tashlykova T.A.* Specific features of manifestation of induced seismicity in the Bratsk reservoir // Book of abstracts European Seism. Commission 33-sd General Assambly. Moscow, 19–24 August 2012. Moscow–Obninsk. 2012. P. 233–234.