

**О выборе базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений**

*Гаврилов В.А.<sup>1</sup>, Бусс Ю.Ю.<sup>1</sup>, Соломатин А.В.<sup>1</sup>, Морозова Ю.В.<sup>1</sup>, Полтавцева Е.В.<sup>1</sup>, Титков Н.Н.<sup>2</sup>, Рябинин Г.В.<sup>2</sup>*

**On the choice of a basic physical model for the processes preceding strong Kamchatka earthquakes**

*Gavrilov V.A., Buss Yu.Yu., Solomatin A.V., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V., Titkov N.N., Ryabinin G.V.*

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: vgavr1403@mai.ru*

<sup>2</sup> *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Обсуждаются вопросы, связанные с выбором базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений. Показывается, что подготовка Жупановского землетрясения ( $M_w=7.2$ ;  $Re=104$  км;  $H=177$  км;  $S=37\%$ ; 30.01.2016 г.) соответствует консолидационной модели И.П. Добровольского.

Базовая физическая модель подготовки сильных землетрясений – одна из ключевых позиций подхода к среднесрочному и краткосрочному прогнозированию сильных камчатских землетрясений [1, 2]. Предполагается, что обоснованный выбор такой модели позволит рассчитывать для заключительной стадии подготовки сильных землетрясений ожидаемые изменения данных системы мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, действующей на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП).

В качестве такой модели ранее предварительно была выбрана дилатантно-диффузионная (ДД) модель [5], считающаяся в настоящее время наиболее известной и общепризнанной. Физическим базисом ДД-модели являются дилатантно-диффузионные процессы, происходящие в геосреде на заключительных стадиях подготовки сильного землетрясения. Согласно ДД-модели процесс подготовки землетрясения состоит из трех основных стадий. Стадия I – нарастание упругой деформации до некоторого критического уровня (порядка 50 % от предельного значения). Стадия II – развитие дилатансионных процессов с соответствующим увеличением объема порово-трещинного пространства геосреды. Стадия III – приток жидкого флюида в область пониженного флюидного давления с сопутствующим понижением прочности, приводящим в итоге к магистральному разрыву – сильному землетрясению. Несмотря на ряд вопросов к ДД-модели, невозможно не признавать физическую обоснованность связи дилатансионных и фильтрационных процессов с процессами подготовки сильных тектонических землетрясений. Вместе с тем, при выборе модели необходимо учитывать особенности конкретной зоны подготовки землетрясения, которые во многом определяют механизм поступления и влияния жидкого флюида на процессы в зоне будущего очага землетрясения.

Результаты, полученные авторами на предыдущем этапе исследований, показывают, что в ряде случаев на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений удавалось выделять интервалы, которые по характеру изменений данных комплексных скважинных измерений можно было интерпретировать как стадии дилатансии или подтока жидкого флюида. Однако при этом выделить отдельно стадию подтока жидкого флюида как заключительную стадию, непосредственно предшествующую моменту основного толчка, не представлялось возможным. Это можно объяснить тем, что в процессы подготовки сильных землетрясений вовлекаются огромные объемы неоднородной геосреды, блоки которой отличаются значениями накопленной упругой деформации. По этой причине, в-первых, развитие дилатансионных и фильтрационных процессов в огромном объеме зоны подготовки землетрясения может происходить одновременно в разных локальных

областях. Во-вторых, учитывая, что такие области геосреды могут отличаться исходными значениями накопленной упругой деформации, переходы от стадии накопления упругой деформации к стадии дилатансии, а затем к стадии подтока жидкого флюида не могут происходить в одно и то же время для разных областей геосреды. В целом, анализ данных многолетнего комплексного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений показал, что ДД-модель не может быть выбрана в качестве базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений.

### **Результаты детального анализа данных комплексных геофизических измерений в рамках модели консолидации И.П. Добровольского**

В 2023 г. в рамках продолжения работ по выбору базовой физической модели был проведен анализ многолетних временных рядов комплексных скважинных измерений совместно с данными ГНСС измерений, данными сейсмических наблюдений, а также с результатами гидрогеохимического мониторинга на скважинах ПГП.

Одним из наиболее важных результатов, полученных в ходе этих исследований, является установление того факта, что характер изменений временных рядов данных комплексных геофизических измерений на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений соответствует модели консолидации И.П. Добровольского. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты, полученные в ходе измерений на ПГП на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения ( $M_w=7.2$ ;  $R_e=104$  км;  $H=177$  км;  $S=37$  %; 30.01.2016 г.) – самого сильного по величине параметра  $S$  сейсмического события за последние 20 лет. Поясним, что под «активной фазой подготовки землетрясения» понимается временной интервал, на котором имеют место значимые изменения НДС геосреды, связанные с подготовкой землетрясения. Величина  $S=L/R_h \cdot 100$ , %, где  $L=10^{0.44M-1.29}$  – длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом [4];  $M$  – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту;  $R_h$  – гипоцентральное расстояние в км.

Из данных, представленных на рис. 1, можно видеть, что результаты комплексных скважинных измерений, проводимые на одном и том же пункте, а также результаты мониторинга сетью пространственно разнесенных пунктов, показывают согласованность (по своему физическому смыслу) вариаций для различных видов мониторинга НДС геосреды в районе ПГП. Такой характер результатов измерений указывает на процесс консолидации геосреды в зоне измерений, что соответствует модели подготовки по механизму консолидации, сформулированной И.П. Добровольским [3]. Нулевая стадия указанной модели – асейсмичное состояние, фоновые вариации. Стадия I – стадия консолидации, формирование жесткой неоднородности. Продолжительность стадии I значительно превышает продолжительность последующих стадий. Стадия II – начало распада неоднородности, формирование положения магистрального разрыва. Распад неоднородности сопровождается интенсивным трещинообразованием, небольшими форшоками, проявлением краткосрочных предвестников. Стадия III – образование очага землетрясения. Стадия IV – стадия афтершоков, окончательное разрушение области консолидации (неоднородности) афтершоками и пластическими подвижками.

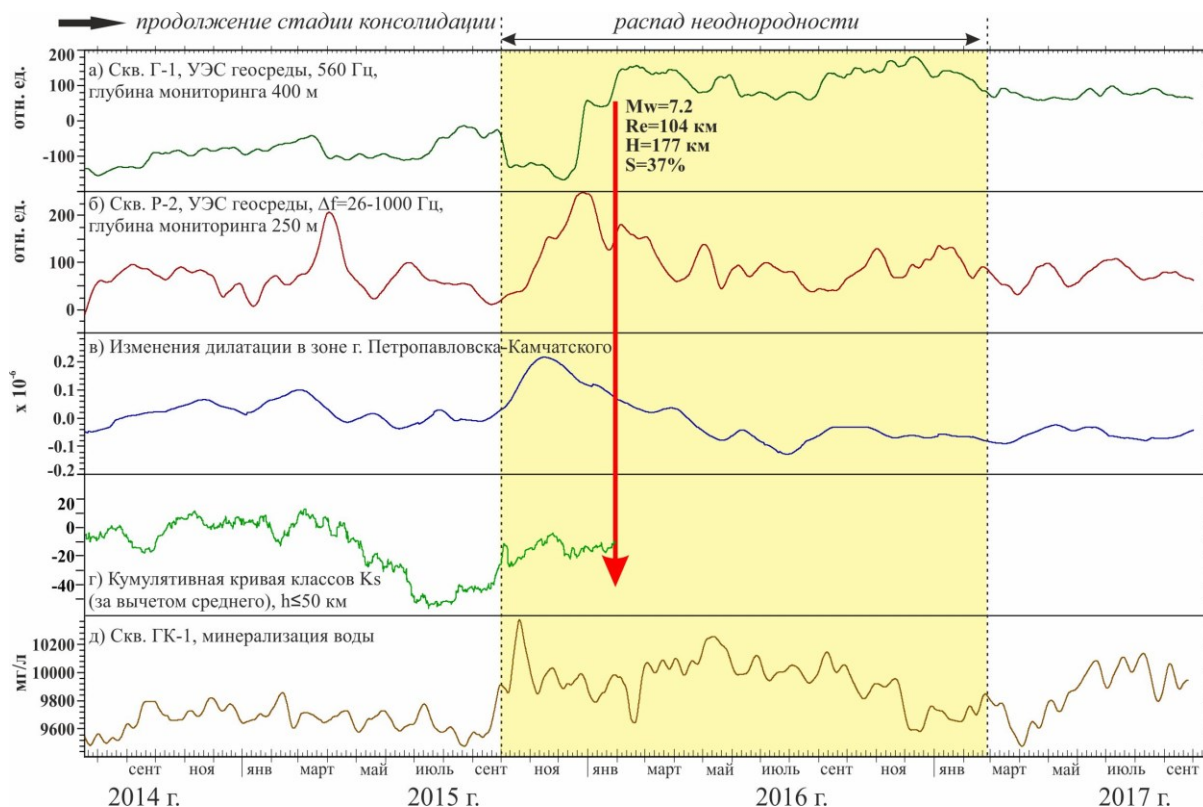


Рис. 1. Изменения временных рядов данных комплексных геофизических измерений в районе ПГП на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения: а) – изменения УЭС в зоне скв. Г-1 на глубине 400 м; б) – изменения УЭС в зоне скв. Р2 на глубине 250 м; в) – изменения дилатации в зоне г. Петропавловска-Камчатского; г) – кумулятивная кривая энергетических классов  $K_s$  за вычетом среднего значения для землетрясений с глубиной до 50 км; д) – изменения минерализации воды, скв. ГК-1.

На рис. 2 представлены результаты многолетнего непрерывного мониторинга изменений УЭС в районе ПГП по данным электромагнитных измерений с подземной электрической антенной, созданной на базе скважины Г-1 [1]. На рис. 2б представлен долговременный тренд исходных данных, выделенный путем их обработки с окном сглаживания 2 года. Предположительно, изменения тренда отражают медленные изменения НДС геосреды в зоне восточного побережья Камчатки, вызванные геодинамическими процессами. Представленные на рис. 1 результаты показывают, что началом стадии консолидации для Жупановского землетрясения можно считать июнь-июль 2013 г. Именно с этого момента начинаются высокоамплитудные вариации УЭС геосреды на фоне монотонного роста базового уровня УЭС (выделено красным на рис. 2б). В рамках модели консолидации такой характер изменений УЭС соответствует процессу формирования жесткой неоднородности за счет присоединения новых блоков. В условиях роста сжимающих напряжений увеличение базового уровня УЭС в этом случае закономерно за счет деформирования трещиноватой влагонасыщенной геосреды. Следует отметить, что 24 мая 2013 г., т.е. накануне начала активной фазы подготовки Жупановского землетрясения (стадии консолидации) произошло сильнейшее ( $M_w=8.3$ ) глубокое ( $H=630$  км) Охотоморское землетрясение – самое сильное сейсмическое событие в мире среди землетрясений сопоставимой глубины. Эпицентр землетрясения находился в районе Охотского моря примерно в 365 км от эпицентра Жупановского землетрясения. Можно предположить, что изменения НДС геосреды в период подготовки и реализации Охотоморского землетрясения могли оказать влияние на подготовку Жупановского землетрясения.

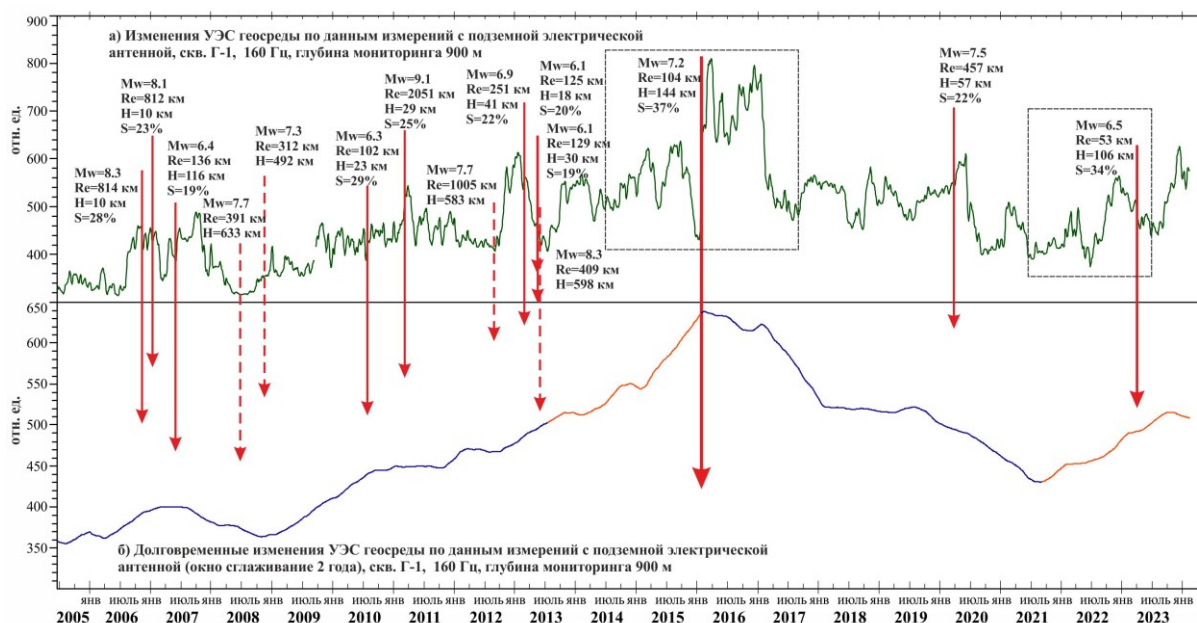


Рис. 2. Изменения УЭС геосреды в районе ППП по данным измерений с подземной электрической антенной: а) – исходные результаты для глубины мониторинга 900 м; б) – долговременный тренд, выделенный из исходных данных путем обработки с окном сглаживания 2 года.

Представленные результаты показывают, что подготовка наиболее сильного за последние 20 лет по величине параметра  $S$  Жупановского землетрясения соответствует модели консолидации, разработанной И.П. Добровольским. Ограниченный объем публикации не позволил предоставить соответствующие результаты по другим сильным камчатским землетрясениям. Однако можно отметить, что, в частности, подготовка близкого по величине параметра  $S$  Вилучинского землетрясения ( $M_w=6.5$ ;  $Re=53$  км;  $H=105$  км;  $S=34$  %; 03.04.2023 г.) также соответствует модели консолидации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-27-00352 (<https://rscf.ru/project/23-27-00352/>).

### Список литературы

1. Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Власов Ю.А. и др. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52-78.
2. Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Соломатин А.В., и др. Концепция подхода к краткосрочному прогнозированию времени сильнейших землетрясений в районе Авачинского залива (Камчатка) // В сборнике: Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 2021. С. 245-251.
3. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
4. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. В кн.: Исследования по физике очага землетрясения / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1976. С. 9-27.
5. Sholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. 1973. V. 181. № 4102. P. 803-810.