

## ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЗАКАЧКОЙ ЖИДКОСТИ

С. Б. Турунтаев<sup>1,\*</sup>, В. Ю. Рига<sup>1,2</sup>, Н. А. Барышников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Росси

\*E-mail: stur@idg.ras.ru

По данным сайта <https://inducedearthquakes.org/> к настоящему времени уже насчитывается более 1370 случаев возникновения техногенных и триггерных землетрясений, из которых примерно 70% связаны с воздействием на флюидные системы в недрах. Случаи катастрофических землетрясений при этом редки и не всегда их триггерный характер является доказанным. К катастрофическим землетрясениям, вызванным закачкой жидкости, относятся, безусловно, землетрясение 15.11.2017 г. в Похане, Южная Корея ( $M_w$  5,5, глубина очага 4.5 км), землетрясение с магнитудой  $M_w$  5.6, произошедшее в начале сентября 2016 г. в штате Оклахома (США). Опасность техногенных землетрясений обусловлена, помимо прочего, тем, что очаги этих сейсмических событий располагаются в зоне ведения работ или на небольшом удалении от них и имеют, зачастую, небольшую глубину. Толчки даже небольшой интенсивности приводят к разрушениям зданий, построенных без применения мер повышенной сейсмостойкости, вызывают беспокойство населения. Крупнейшее в Европе газовое месторождение Гронинген (Нидерланды) было выведено из эксплуатации именно в связи с развитием техногенной сейсмичности. Имевшиеся оценки не предполагали появления землетрясений большой магнитуды, однако протесты населения вынудили прекратить разработку месторождения.

Ограничения, вводимые в ряде регионов мира на допустимые объемы воздействия на флюидные системы, сделали актуальной разработку научно обоснованных методов оценки связи магнитуд техногенных землетрясений с характеристиками воздействий. Исследованию механизмов развития индуцированной сейсмичности посвящено большое количество публикаций. Важным фактором является снижение эффективных нормальных напряжений на разломах при повышении порового давления, однако этого недостаточно: сейсмичность регистрируется и при относительно низких давлениях закачки. С. А. Шапиро с соавторами ввели параметр, названный сейсмогенным индексом, который связывает магнитуду индуцированных землетрясений с суммарным объемом закачки жидкости. Этот параметр применялся для разных регионов, но накапливающиеся данные не подтвердили наличие очевидной связи объемов закачки с магнитудами сейсмических событий. Другой метод оценки максимальной ожидаемой магнитуды техногенных землетрясений связан с поиском зависимости магнитуды землетрясений от скорости изменения порового давления, определяемой расходом закачиваемой жидкости.

В представленном докладе рассматриваются эти два способа оценки максимальных магнитуд землетрясений, индуцированных закачкой жидкости. Более детально представлена модель инициирования скольжения разлома закачкой жидкости, основанная на законе трения типа *rate-and-state*. Путем анализа результатов расчетов определены условия перехода асейсмических подвижек в сейсмогенерирующие, получены оценки магнитуд возможных сейсмических событий. Показано, что в рамках рассмотренной модели при росте скорости закачки происходит насыщение скорости скольжения и, соответственно, магнитуд возможных землетрясений, что может быть положено в основу оценки максимальных значений магнитуд индуцированных землетрясений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012100531-7).*

## A POSSIBILITY TO ESTIMATE MAXIMAL MAGNITUDE OF INJECTION INDUCED EARTHQUAKES

S. B. Turuntaev<sup>1,\*</sup>, V. Y. Riga<sup>1,2</sup>, N. A. Baryshnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

\*E-mail: [stur@idg.ras.ru](mailto:stur@idg.ras.ru)

According to the website <https://inducedearthquakes.org/>, there have been over 1,370 cases of induced and triggered earthquakes to date, approximately 70% of which are associated with impacts on subsurface fluid systems. Catastrophic earthquakes are rare, and their trigger nature is not always proven. Fluid injection catastrophic earthquakes include, without a doubt, the November 15, 2017, earthquake in Pohang, South Korea ( $M_w$  5.5, focal depth 4.5 km), and the  $M_w$  5.6 earthquake that occurred in early September 2016 in Oklahoma, USA. The danger of man-made earthquakes is related, among other things, to the fact that the foci of these seismic events are located in the work zone or at a short distance from it and are often shallow. Even low-intensity tremors lead to the destruction of buildings constructed without seismic safety measures, causing public concern. Europe's largest gas field, Groningen, Netherlands, was decommissioned precisely due to the man-made seismicity. Existing assessments did not predict the occurrence of large-magnitude earthquakes, but public protests forced the cessation of field development.

Restrictions imposed in several regions of the world on permissible impacts on fluid systems have necessitated the development of scientifically grounded methods for assessing the relationship between man-made earthquake magnitudes and impact characteristics. Numerous publications have been devoted to the study of the mechanisms of induced seismicity. A key factor is the reduction in effective normal stresses on faults with increasing pore pressure, but this is insufficient seismicity is also recorded at relatively low injection pressures. S. Shapiro and co-authors introduced a parameter called the seismogenic index, which relates the magnitude of induced earthquakes to the total volume of fluid injected. This parameter was applied to various regions, but accumulating data did not confirm a clear relationship between injection volumes and seismic event magnitudes. Another method for estimating the maximum expected magnitude of man-made earthquakes involves finding the relationship between earthquake magnitude and the rate of pore pressure change, determined by the flow rate of injected fluid

This paper examines these two methods for estimating the maximum magnitude of earthquakes induced by fluid injection. A model for the initiation of fault slip by fluid injection, based on the rate-and-state friction law, is presented in more detail. By analyzing the numerical calculation results, the conditions for the transition from aseismic to seismogenic slip are determined and estimates of the magnitudes of potential seismic events are obtained. It is shown that within the framework of the considered model, with an increase in the injection rate, the sliding velocity and, accordingly, the magnitudes of possible earthquakes are saturated, which can be used as a basis for assessing the maximum values of the magnitudes of induced earthquakes.