

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

ДИСКУССИИ

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137>

О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил»*

© 2021 М. В. Родкин^{1,2,3}

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

³Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Резюме. Не по многим вопросам наблюдается такое различие мнений, как о существовании и характере форшоковой активизации. Диапазон здесь от публичного признания, что описанный ранее эффект форшоковой лавинообразной активизации – не более чем результат (пусть и неосознанной) подгонки данных, до случаев неправдоподобно точных прогнозов времени сильных землетрясений (пусть и ретроспективных). Статья А.И. Малышева и Л.К. Малышевой, публикуемая в настоящем выпуске журнала, дала повод снова вернуться к этим разногласиям – и предложить возможный вариант их объяснения.

Ключевые слова: метод саморазвивающихся процессов, accelerated seismic moment release (AMR), форшоковый каскад, случайная и систематическая компоненты сейсмического режима

On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva “Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region”

Mikhail V. Rodkin^{1,2,3}

¹Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³Institute of Oil and Gas Problems, RAS, Russia

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Abstract. Not so many issues, that have such a divergence of view, as on the existence and nature of foreshock activation. The range here is from public admission, that the previously described effect of foreshock avalanche-like activation is nothing more than the result of (though unconscious) data fitting, to the cases of incredibly accurate predictions of the time of strong earthquakes (though retrospective). The article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva, published in the current issue, gave a reason to return to these disagreements again and to offer a possible explanation for them.

Keywords: method of the self-developing processes, accelerated seismic moment release (AMR), foreshock cascade, random and systematic components of a seismic regime

Для цитирования: Родкин М.В. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил». *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 128–137. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137>

For citation: Rodkin M.V. On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva “Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region”. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137>

* См. статью в настоящем выпуске журнала, с. 84–112. Указанная статья и настоящее сообщение публикуются на русском и английском языках.

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (тема АААА-А19-119011490129-0), Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (тема АААА-А18-118012290125-2.2) и Института проблем нефти и газа РАН (тема АААА-А19-119013190038-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-05-00466).

Автор признателен Л.М. Богомолу за предложение развернуть рецензию на статью в полноценную публикацию, за пожелания дополнительно обсудить ряд важных спорных вопросов и за обсуждения в процессе подготовки публикации.

В довольно далеком уже 2009 году, когда мне довелось быть оппонентом докторской диссертации И.Н. Тихонова, на меня сильное впечатление произвели полученные им ретроспективные прогнозы времени ряда сильных сахалинских землетрясений [Тихонов, 2009, 2019 и др.]. Иван Николаевич для прогноза времени сильных землетрясений использовал метод саморазвивающихся процессов (СРП) А.И. Малышева в его же программной реализации [Малышев, 1991; Малышев, Тихонов, 1991, 2007; Тихонов, 2008; Tikhonov, Rodkin, 2012; и др.]. В СРП-методе развитие форшковой последовательности описывается процессом с обострением. Задается общее уравнение процесса с обострением. Выбирается параметр (например, сейсмическая энергия) и интервал времени; на основании этих данных рассчитывается момент времени выхода процесса на вертикальную асимптоту. Потрясающе, но время некоторых событий таким образом ретроспективно угадывалось с точностью до нескольких дней или часов или даже нескольких минут**. Заметим, что для таких удивительных прогнозов использовались данные о сейсмическом процессе до самого момента сильного землетрясения; отсюда понятно, что такие прогнозы и не могли быть получены иначе как ретроспективно.

В дальнейшем метод СРП применялся и дорабатывался [Тихонов и др., 2017; Закупин и др., 2019; Малышев, 2020; и др.]. Однако эффективность этого метода остается дискуссионной. В первую очередь нарекания вызывают неустойчивость результатов прогноза и проблема отбраковки ложных прогнозов; ошибки пропуща цели встречаются относительно реже.

Весьма похожим образом, хотя и под другими названиями, развивалась ситуация и на «международной арене». Аналог режима саморазвивающегося лавинообразного СРП-

процесса носит в международной терминологии название “accelerated moment release model” (AMR model). Такой режим ускоренного роста величин сейсмического момента наблюдался при ряде землетрясений и тоже породил надежды, что если уточнить методику анализа данных, то удовлетворительно точный прогноз скоро будет получен [Bowman et al., 1998; Jaumé, Sykes, 1999; Bowman, King, 2001; Sammis et al., 2004; и др.]. Основное различие подхода англоязычных авторов и подхода на основе СРП-метода в том, что при обсуждении AMR-эффекта не ставится задача определить момент выхода процесса на вертикальную асимптоту, и потому прогноз времени события оказывается менее определенным и не вызывает такого смешанного с восхищением сильного недоумения, как отдельные результаты, полученные И.Н. Тихоновым. При этом развитие AMR-режима находит естественную интерпретацию как в рамках представлений об аналогии сильных землетрясений с критическими явлениями, так и в плане эффекта роста тектонической нагрузки, собственно и приводящей к землетрясениям [Bak, 1996; Bowman et al., 1998; Bowman, King, 2001].

Развитие AMR-модели встретило, однако, и серьезные возражения. С самого начала было понятно (как и в случае с моделью СРП-процесса), что выделение AMR-аномалии и характер аномалии существенным образом зависят от выбора интервала времени для анализа. Неясно при этом также, что, собственно, нарастает – растет ли число событий, или растет средняя величина сейсмических событий [Vere-Jones, 2001]. При многих землетрясениях AMR-аномалия не наблюдалась, а в других случаях наблюдалась только при специальном выборе интервала времени для расчета. На волне такой критики один из пропагандистов этого подхода D. Bowman, выступая на конференции

** Это казалось совершенно неправдоподобным, но автор на мое недоумение только разводил руками – ну я же не виноват, что так получается, не специально же мне ухудшать и фальсифицировать полученные результаты? При этом Иван Николаевич сам посмеивался над такой точностью и не забывал отметить, что в большинстве случаев такого прогноза не получается. А ведь способность посмеяться над собственным прогнозом среди предсказателей землетрясений – явление не частое, и оно само по себе уже рождает доверие. Защита прошла вполне успешно.

в 2007 г., признал, что представленный ранее эффект AMR [Bowman et al., 1998] – скорее всего не более чем результат подгонки данных, пусть даже и не осознанной. В этом же ключе в работе [Hardebeck et al., 2008] делается вывод, что развитие аномалии AMR-типа трудно формализуемо, статистически незначимо и потому не может использоваться в качестве надежного прогнозного признака.

Заметим, что критика реальности существования AMR-аномалии развивалась в русле более общего критического направления исследований. Аргументированно ставилась под сомнение сама принципиальная возможность прогноза землетрясений [Geller et al., 1997]. Одновременно с возможностью прогноза были поставлены под сомнение и такие, ранее считавшиеся надежно установленными, законы и характерные особенности сейсмического режима, как существование форшокового каскада активизации, выполнения закона Омори, существование характеристических землетрясений, сейсмического цикла и сейсмических брешей [Ромашкова, Кособоков, 2001; Hardebeck et al., 2008; Kagan et al., 2012]. В перечисленных работах все эти явления не нашли однозначного статистического подтверждения и потому были поставлены под сомнение. Достаточно быстро сомнения были сняты разве только с выполнимости закона Омори, но и он трактуется не более как статистическая тенденция, с указаниями на очень сильную случайную компоненту в сейсмическом режиме, возможность в значительной степени случайного возникновения сильных афтершоков и на развитие вторичных каскадов афтершоков.

Подчеркнем, что такая же ситуация имеет место и в случае с другими поставленными под сомнение закономерностями сейсмического процесса. Все они маскируются случайной компонентой сейсмического процесса и могут только более или менее определенно угадываться на фоне этой доминирующей случайной компоненты.

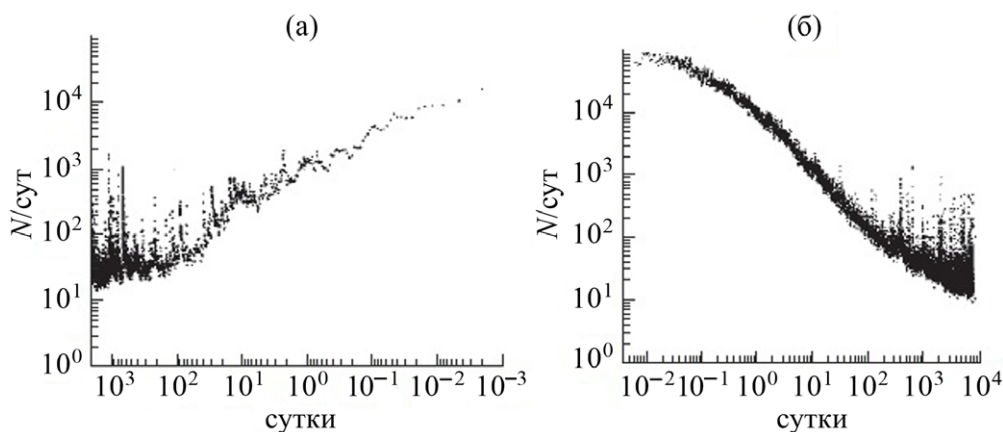
Известным способом выделения систематической компоненты на фоне сильного случайного процесса является статистический метод суммирования многих примеров, в каждом из которых общая систематическая компонента может быть почти незаметной. Применительно к данному случаю такой подход был реализован в методе построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) [Родкин, 2008; Rodkin, 2012;

Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020]. При построении ООСЗ отбираются события, попавшие в окрестность одного из большого числа (несколько сотен, до 1000) сильнейших землетрясений данного каталога. Под окрестностью понимаются события, происшедшие от очага данного главного сильного события на расстоянии не более n размеров очага главного события. Число n обычно принимается в интервале 3–6. Для расчета размера очага R (в километрах) в зависимости от магнитуды используется одна из формул, приводимых в работах [Соболев, 1993; Wells, Coppersmith, 1994]; разные формулы дают качественно аналогичные результаты. Опыт построения ООСЗ показывает, что при использовании для построения ООСЗ 100 и менее сильнейших событий сохраняются довольно сильные флуктуации и тенденции изменения исследуемых параметров оказываются замаскированными.

Методом ООСЗ были подтверждены представления о развитии степенных фор- и афтершокового каскадов. Также был выявлен ряд аномалий (частично неизвестных ранее) для других параметров сейсмического режима. Здесь нас интересует характер форшоковой аномалии. На рисунке показан пример ООСЗ для фор- и афтершоковых каскадов по данным мирового ISC каталога, $n = 5$, число использованных при построении ООСЗ сильнейших землетрясений $N = 500$, при построении использованы события $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ км.

Афтершоковый каскад (см. рисунок, б) полностью отвечает обобщенному закону релаксации потока афтершоков Омори–Утсу. Но не менее определенно выглядит и форшоковая аномалия (см. рисунок, а). По характеру нарастания форшокового степенного роста числа событий (а также по аналогичным аномалиям для выделенной сейсмической энергии и величинам сейсмического момента) нетрудно спрогнозировать момент обобщенного сильного землетрясения. Погрешность такой оценки составит не более 10 минут. Такая оценка была бы получена и при применении методики СРП к анализу данных по росту афтершоковой активности в ООСЗ.

Сравнение с результатами, полученными при анализе ООСЗ, позволяет предложить объяснение обсуждавшимся выше противоречивым выводам о характере форшокового процесса, наличии/отсутствии развития СРП-процесса и наличии/отсутствии AMR-эффекта. Представляется возможным заключить, что



Динамика форшокового (а) и афтершокового (б) процесса в ООСЗ, по [Родкин, 2020].

СРП-процесс и его аналог AMR-эффекты имеют место, но в каждом конкретном случае они оказываются сильно замаскированными доминирующей случайной компонентой сейсмического режима, индивидуальной для окрестности и каждого отдельного сильного землетрясения. В связи с этим с полной очевидностью эти эффекты проявляются только в ООСЗ. При анализе каждого отдельного сильного землетрясения они только угадываются, с той или иной степенью неопределенности. Представляется, однако, возможным, что в ряде случаев случайная компонента сейсмического режима не играет решающей роли, и в этом случае режим AMR-аномалии проявляется достаточно определенно, а метод СРП позволяет получить хорошую оценку момента соответствующего сильного события, как это иногда и наблюдалось по результатам расчетов И.Н. Тихонова.

Приведем дополнительные свидетельства в пользу существования AMR-эффекта, весомо подкрепляющие результаты сопоставления с выводами, полученными при построении и анализе ООСЗ. В работе [Wang et al., 2008] приводятся свидетельства наблюдения аналога AMR-процесса в лабораторных исследованиях по акустической эмиссии. А в работе [Cianchini et al., 2020] по результатам анализа статистических данных о режиме сейсмичности в окрестности исследованной совокупности сильных землетрясений и их сравнению с результатами численного моделирования было получено, что наблюдаемый AMR-процесс в большинстве рассмотренных случаев является реальной особенностью сейсмического режима, а не случайной его флуктуацией.

Закключаем, что лавинообразный СРП-процесс и AMR-эффект, по-видимому, явля-

ются реальной характерной особенностью форшокового процесса и, соответственно, могут быть использованы в целях прогноза землетрясений. Проблема при этом состоит в выделении информативной систематической компоненты на фоне сильного и, по-видимому, случайного шума. В этом контексте предложенная в указанной работе А.И. Малышева и Л.К. Малышевой идея ориентироваться при применении метода СРП на подобие со случаями развития ранее наблюдавшихся форшоковых последовательностей представляется довольно спорной; впрочем, реальную эффективность того или иного алгоритма прогноза землетрясений может показать только практика его использования в реальном времени.

Существование в ООСЗ целого комплекса явственных предвестниковых аномалий вполне очевидно. Из существования этих вполне явственных аномалий следует принципиальная возможность прогноза, в частности возможность достаточно точного «прогноза» времени обобщенного сильного землетрясения. Неясно, однако, каковы перспективы перенесения этого результата на случай отдельного сильного землетрясения. Следует ли ожидать, что увеличение объема доступной прогнозируемой информации, скажем, на 2 порядка и многим более, как при построении ООСЗ, обеспечит возможность аналогичного достаточно точного прогноза уже не обобщенного, а отдельного сильного землетрясения? Или даже такое резкое увеличение объема доступной информации не окажется эффективным, так как в этой информации по-прежнему будут доминировать нетипичные случайные особенности данной конкретной форшоковой последовательности? Ответа на эти вопросы пока нет.

Список литературы

1. Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. 2019. Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 377–389. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>
2. Малышев А.И. 1991. Динамика саморазвивающихся процессов. *Вулканология и сейсмология*, 4: 61–72.
3. Малышев А.И. 2020. Прогнозируемость потока сейсмической энергии Южной Европы и Средиземноморья. *Вулканология и сейсмология*, 1: 33–48.
4. Малышев А.И., Тихонов И.Н. 1991. Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей землетрясений в районе Южных Курильских островов. *Доклады АН СССР*, 319(1): 134–137.
5. Малышев А.И., Тихонов И.Н. 2007. Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени. *Физика Земли*, 6: 37–51.
6. Родкин М.В. 2008. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения. *Вулканология и сейсмология*, 6: 66–77.
7. Родкин М.В. 2020. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация. *Вулканология и сейсмология*, 1: 64–76.
8. Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. 2001. Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000. *Вычислительная сейсмология*, 32: 162–189.
9. Соболев Г.А. 1993. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 314 с.
10. Тихонов И.Н. 2008. Прогноз землетрясений по сейсмологическим данным: методики, достижения, перспективы. В кн.: *Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: сб. материалов II (XX) Сахалинской молодежной науч. школы, Южно-Сахалинск, 4–10 июня 2007 г.* (отв. ред. О.Н. Лихачева). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, с. 7–24.
11. Тихонов И.Н. 2009. *Методология прогноза сильных землетрясений по потоку сейсмичности на примере северо-западной части Тихоокеанского пояса*: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, 41 с.
12. [Тихонов И.Н.] 2019. *Иван Николаевич Тихонов. Вопросы сейсмологии*: Избр. труды. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 290 с.+1 электрон. опт. диск (DVD). doi:10.30730/978-5-6040621-4-2.2019-2
13. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. 2017. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14.
14. Bak P. 1996. *How Nature Works*. New York: Springer-Verlag, 212 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1>
15. Bowman D.D., King G.C.P. 2001. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 28(21): 4039–4042. <https://doi.org/10.1029/2001GL013022>
16. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. 1998. An observational test of the critical earthquake concept. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24359–24372. <https://doi.org/10.1029/98jb00792>
17. Cianchini G., De Santis Ang., Giovambattista R.D., Abbattista C., Amoroso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Santis Anna, Marchetti D. et al. 2020. Revised accelerated moment release under test: Fourteen worldwide real case studies in 2014–2018 and simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 4057–4087. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02461-9>
18. Geller R.J., Jaksón D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. 1997. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275: 1616–1617. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
19. Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J. 2008. Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. of Geophysical Research*, 113(B08310). doi:10.1029/2007JB005410
20. Jaumé S., Sykes L. 1999. Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 155: 279–305. <https://doi.org/10.1007/s000240050266>
21. Kagan Y.Y., Jackson D.D., Geller R.J. 2012. Characteristic earthquake model, 1884–2011, R.I.P. *Seismological Research Letters*, 83(6): 951–953. <https://doi.org/10.1785/0220120107>
22. Rodkin M.V. 2012. Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development. In: *Extreme events and natural hazards: The complexity perspective*: Geophysical Monograph Series, 196. doi:10.1029/2011GM001060
23. Rodkin M.V., Tikhonov I.N. 2016. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth*, 95: 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001>
24. Sammis C., Bowman D., King G. 2004. Anomalous seismicity and accelerating moment release preceding the 2001 and 2002 earthquakes in Northern Baja California, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 2369–2378. doi:10.1007/S00024-004-2569-3
25. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. 2012(2011). The current state of art in earthquake prediction, the typical precursors, and the experience in the earthquake forecasting at the Sakhalin Island and the surrounding areas. In: (Ed. Sebastiano D'Amico) *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Book 5, p. 43–79. doi:10.5772/28689
26. Vere-Jones D., Robinson R., Yang W. 2001. Remarks on the accelerated moment release model: problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophysical J. International*, 144: 517–531. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x>
27. Wang L., Shengli Ma, Li Ma. 2008. Accelerating moment release of acoustic emission during rock deformation in the laboratory. *Pure and Applied Geophysics*, 165(2): 181–199. doi:10.1007/s00024-008-0305-0
28. Wells D.L., Coppersmith K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. of the Seismological Society of America*, 84(4): 974–1002.

DISCUSSIONS

<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.128-132.133-137>

TRANSLATION

On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva “Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region”*

Mikhail V. Rodkin^{1,2,3}

¹Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³Institute of Oil and Gas Problems, RAS, Russia

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Abstract. Not so many issues, that have such a divergence of view, as on the existence and nature of foreshock activation. The range here is from public admission, that the previously described effect of foreshock avalanche-like activation is nothing more than the result of (though unconscious) data fitting, to the cases of incredibly accurate predictions of the time of strong earthquakes (though retrospective). The article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva, published in the current issue, gave a reason to return to these disagreements again and to offer a possible explanation for them.

Keywords: method of the self-developing processes, accelerated seismic moment release (AMR), foreshock cascade, random and systematic components of a seismic regime

For citation: Rodkin M.V. On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malyshev and L.K. Malysheva “Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region”. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.128-132.133-137>

Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS (theme AAAA-A19-119011490129-0), Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS (theme AAAA-A18-118012290125-2.2) and Institute of Oil and Gas Problems RAS (theme AAAA-A19-119013190038-2) with a partial support from the RFBR (project № 19-05-00466).

Author is grateful to Leonid Bogomolov for the proposal to turn a peer review of the article into a full-fledged publication, for wishes to additionally discuss the number of important controversial issues and for the discussion during the publication preparing.

In quite distant 2009, when I happened to be an opponent of a doctor dissertation by I.N. Tikhonov, I was deeply impressed by the retrospective predictions of the time of a number of strong Sakhalin earthquakes that he obtained [Tikhonov, 2009, 2019, etc.]. To predict the time of strong earthquakes, Ivan Nikolaevich used the method of self-developing processes (SDP) by A.I. Malyshev in his own software implementation [Maly-

shev, 1991; Malyshev, Tikhonov, 1991, 2007; Tikhonov, 2008; Tikhonov, Rodkin, 2012; etc.]. The SDP method describes the development of a foreshock sequence by an escalation process; the general equation of the peaking process is set, a parameter (for example, seismic energy) and a time interval are selected; on the basis of these data, the timepoint, when the process reaches the vertical asymptote, can be calculated. That is amazing, but

* See this article in English in the current issue of the Journal.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: M.B. Родкин. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил». Translation by G.S. Kachesova

the time of some events was thus retrospectively guessed with an accuracy of several days or hours or even several minutes**. Note that for such extraordinary predictions, the seismic process data until the very moment of a strong earthquake were used; therefore, it is clear, that such predictions could not have been obtained otherwise than retrospectively.

Later on, the SDP method was applied and refined [Tikhonov et al., 2017; Zakupin et al., 2019; Malyshev, 2020; etc.]. However, the effectiveness of this method remains controversial. First of all, complaints are caused by the instability of prediction results and the problem of rejecting the false predictions; target omission errors are relatively less common.

The situation in the “international arena” developed in a very similar way, though under different names. An analogue of the self-developing avalanche-like process is called the “accelerated moment release model” (AMR model) in international terminology. Such a mode of accelerated growth of the seismic moment values was observed during a number of earthquakes and also raised hopes that, if the data analysis technique is refined, a satisfactory accurate prediction will soon be obtained [Bowman et al., 1998; Jaumé, Sykes 1999; Bowman, King, 2001; Sammis et al., 2004; etc.]. The main difference between the approach of English-speaking authors and the approach based on the SDP method is that when discussing the AMR effect, the task is not posed to determine the moment, when the process reaches the vertical asymptote, and therefore the prediction of the event time turns out to be less certain and does not cause such strong bewilderment mixed with admiration, as separate results obtained by I.N. Tikhonov. At the same time, the development of the AMR model finds a natural interpretation both within the framework of the concept of the analogy of strong earthquakes with critical phenomena, and in terms of the effect of tectonic load increase, which actually brings to earthquakes [Bak, 1996; Bowman et al., 1998; Bowman, King, 2001].

However, the development of the AMR model met with serious objections. From the very beginning it was clear (as in the case of the SDP mod-

el) that the identification of the AMR anomaly and the anomaly nature essentially depend on the choice of the time interval for analysis. It is also unclear what does actually increase – whether the number of events increases or the average value of seismic events increases [Vere-Jones, 2001]. For many earthquakes the AMR anomaly was not observed, and for others it was observed only with a special choice of the time interval for the calculation. On the wave of such criticism, one of the promoters of this approach, D. Bowman, speaking at a conference in 2007, admitted that the previously presented AMR effect [Bowman et al., 1998] is most likely nothing more than a result of data fitting, even if not deliberate. In the same vein, the work [Hardebeck et al., 2008] concludes that the AMR type anomaly development is difficult to be formalized, statistically insignificant, and therefore cannot be used as a reliable predictive indicator.

Note, that the criticism of the reality of the AMR anomaly existence developed in the mainstream of a more general critical line of research. The very fundamental possibility of earthquake forecasting was reasonably questioned [Geller et al., 1997]. Simultaneously with the possibility of forecasting, such laws and characteristic features of the seismic regime as the existence of a foreshock cascade of activation, observance of the Omori law, the existence of characteristic earthquakes, a seismic cycle and seismic gaps which had been previously considered reliably, were called into question [Romashkova, Kosobokov, 2001; Hardebeck et al., 2008; Kagan et al., 2012]. All these phenomena did not find unambiguous statistical confirmation in the listed works and therefore were questioned. Quite quickly, the doubts were dispelled, may be only concerning the Omori law, but it is also interpreted as no more than a statistical trend, with indications of a very strong random component in the seismic regime, the possibility of a largely random occurrence of strong aftershocks and the development of secondary aftershock cascades.

It should be stressed, that the same situation takes place in the case of other questioned regularities of the seismic process. All of them are masked by a random component of the seismic

** It seemed completely implausible, but the author only threw up his hands answering my bewilderment – well, is it my fault that this happens, do I have to specially worsen and falsify the results obtained? At the same time, Ivan Nikolaevich himself laughed at such accuracy and did not forget to note that in most cases such a prediction does not work. But the ability to laugh at one’s own prediction among earthquake predictors is not a frequent phenomenon, and it in itself already generates the trust. The defense was quite successful.

process and can only be more or less definitely guessed against the background of this dominant random component.

A well-known method of isolating the systematic component against the background of a strong random process is the statistical method of summing many examples, in each of which the overall systematic component can be almost invisible.

With regard to this case, such an approach was implemented in the method of constructing and analyzing the generalized vicinity of a large earthquake (GVLE) [Rodkin, 2008; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Rodkin, 2020]. When constructing the GVLE, those events are selected, that fall in the vicinity of one of a large number (several hundred, up to 1000) of the strongest earthquakes in the used catalog. The neighborhood is understood as events that occurred at a distance from the focus of a given main strong event of no more than n sizes of the focus of this main event. The number n is usually taken in the range 3–6. To calculate the size of the focus R (in kilometers) depending on the magnitude, one of the formulas given in [Sobolev, 1993; Wells, Coppersmith, 1994] is used; different formulas give qualitatively similar results. The experience in constructing the GVLE shows that when 100 or less strong events are used to construct the GVLE, rather strong fluctuations persist and the trends of change in the parameters under study turned to be masked.

The GVLE method confirmed the development of the power-law foreshock and aftershock cascades. A number of anomalies (partially unknown earlier) were also identified for other parameters of the seismic regime. Here we are interested in the nature of the foreshock anomaly. The Figure

shows an example of the GVLE for foreshock and aftershock cascades according to the world ISC catalog, $n = 5$, the number of strongest earthquakes used in constructing the GVLE $N = 500$, the events with $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ km were used when constructing.

The aftershock cascade (see Figure, b) fully corresponds to the generalized Omori – Utsu law of aftershock sequences relaxation. But the foreshock anomaly looks no less certainly (see Figure, a). By the nature of the increase in the foreshock power-law growth of the number of events (as well as by similar anomalies for the released seismic energy and the magnitude of the seismic moment), it is easy to predict the moment of a generalized strong earthquake. The error of this estimate will be no more than 10 minutes. Such an estimate may be obtained by applying the SDP method to the analysis of data on the growth of aftershock activity in the GVLE.

Comparison with the results obtained in the GVLE analysis allows us to propose an explanation for the contradictory conclusions discussed above about the nature of the foreshock process, the presence/absence of the SDP development and the presence/absence of the AMR effect. It seems possible to conclude that the SDP and its analog AMR effects take place, but in each specific case they turn out to be strongly masked by the dominant random component of the seismic regime, which is individual for the neighborhood and for each separate strong earthquake. In this regard, these effects are manifested with ample evidence in the GVLE only. When analyzing each separate strong earthquake, they are only guessed with varying degrees of uncertainty. However, it seems possible that in a number of cases the random

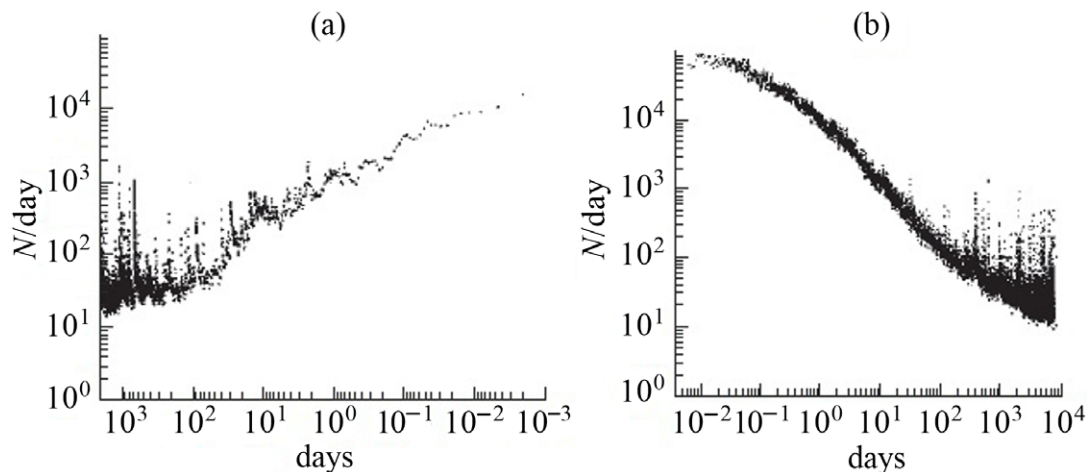


Figure. Dynamics of the foreshock (a) and aftershock (b) process in the GVLE, according to [Rodkin, 2020].

component of the seismic regime does not play a decisive role, and then the AMR anomaly regime manifests itself quite clearly, and the SDP method allows to obtain a good estimate of the moment of the corresponding strong event, as was sometimes observed from the results of calculations by I.N. Tikhonov.

Let us provide additional evidence in favor of the AMR effect existence, which significantly confirms the results of comparison with the conclusions obtained in the construction and analysis of the GVLE. The work [Wang, Ma, 2008] provides evidence of the observation of the AMR process analogue in laboratory studies of acoustic emission. And in [Cianchini et al., 2020], based on the results of the analysis of statistical data on the seismicity regime in the vicinity of the studied aggregate of strong earthquakes and their comparison with the results of numerical modeling, it was obtained that the observed AMR process is a real feature of the seismic regime in most of the considered cases, rather than its random fluctuation.

We conclude, that the avalanche-like SDP and the AMR effect are apparently a real characteristic feature of the foreshock process and, accordingly, can be used for predicting the earthquakes. In this case, the problem is to single out the informative systematic component against the background of

strong and, apparently, random noise. In this context, the idea proposed in [Malyshev, Malysheva, 2021] to be guided by on similarity with the cases of the development of previously observed foreshock sequences when applying of the SDP method, seems to be rather controversial; however, the real efficiency of one or another earthquake forecasting algorithm can only be shown by the practice of its use in real time.

The existence of a whole complex of clear precursor anomalies in the GVLE is rather obvious. The presence of these anomalies implies the fundamental possibility of prediction, in particular, the possibility of a sufficiently accurate «prediction» of the time of a generalized large earthquake. It is unclear, however, what are the prospects for transferring this result to the case of a separate strong earthquake. What chances of that the considerable (2 orders of value or slightly more) growth of seismic data volume involved to this kind of predictions will allow obtaining the reasonable evaluation of the time of solitary major earthquake? Can we expect a prediction accuracy for such event similar to that for GVLE construction? Or even such a sharp increase in the amount of available information will not be effective, since this information will still be dominated by random features of this particular foreshock sequence? There is no answer to these questions yet.

References

1. Bak P. **1996**. *How Nature Works*. New York: Springer-Verlag, 212 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1>
2. Bowman D.D., King G.C.P. **2001**. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 28(21): 4039–4042. <https://doi.org/10.1029/2001GL013022>
3. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. **1998**. An observational test of the critical earthquake concept. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24359–24372. <https://doi.org/10.1029/98jb00792>
4. Cianchini G., De Santis Ang., Giovambattista R.D., Abbattista C., Amoroso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Santis Anna, Marchetti D. et al. **2020**. Revised accelerated moment release under test: Fourteen worldwide real case studies in 2014–2018 and simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 4057–4087. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02461-9>
5. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275: 1616–1617. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
6. Hardebeck J.L., Felzer K.R., Michael A.J. **2008**. Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. of Geophysical Research*, 113(B08310). doi:10.1029/2007JB005410
7. Jaumé S., Sykes L. **1999**. Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 155: 279–305. <https://doi.org/10.1007/s000240050266>
8. Kagan Y.Y., Jackson D.D., Geller R.J. **2012**. Characteristic earthquake model, 1884–2011, R.I.P. *Seismological Research Letters*, 83(6): 951–953. <https://doi.org/10.1785/0220120107>
9. Malyshev A.I. **1991**. Dynamics of self-developing processes. *Volcanology & Seismology*, 4: 61–72. (In Russ.)
10. Malyshev A.I. **2020**. Predictability of the seismic energy flux: Southern Europe and the Mediterranean. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 30–43. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010030>

11. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. **1991**. [Regularities of the dynamics of the foreshock and aftershock sequences in the region of South Kuril Islands]. *Doklady AN USSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 319(1): 134–137. (In Russ.).
12. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. **2007**. Nonlinear regular features in the development of the seismic process in time. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 43(6): 476–489.
13. Rodkin M.V. **2008**. Seismicity in the generalized vicinity of large earthquakes. *J. of Volcanology and Seismology*, 2(6): 435–445. <https://doi.org/10.1134/s0742046308060055>
14. Rodkin M.V. **2012**. Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development. In: *Extreme events and natural hazards: The complexity perspective*: Geophysical Monograph Series, 196. doi:10.1029/2011GM001060
15. Rodkin M.V. **2020**. Typical for- and aftershock anomaly – data, interpretation, application. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 58–69. <https://doi.org/10.1134/s0742046320010066>
16. Rodkin M.V., Tikhonov I.N. **2016**. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth*, 95: 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001>
17. Romashkova L.L., Kosobokov V.G. **2001**. [Seismicity dynamics prior to and after the largest earthquakes worldwide, 1985–2000]. *Vychislitel'naya seysmologiya [Calculating seismology]*, 32: 162–189.
18. Sammis C., Bowman D., King G. **2004**. Anomalous seismicity and accelerating moment release preceding the 2001 and 2002 earthquakes in Northern Baja California, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 161: 2369–2378. doi:10.1007/S00024-004-2569-3
19. Sobolev G.A. **1993**. [*The basis for earthquake prediction*]. Moscow: Nauka, 314 p
20. Tikhonov I.N. **2008**. [Earthquake prediction by the seismological data: methods, achievements, prospects]. In: *Prirodnye katastrofy: izuchenie, monitoring, prognoz: sb. materialov II (XX) Sakhalinskoy molodezhnoy nauch. shkoly, Yuzhno-Sakhalinsk, 4–10 iyunya 2007 g.* (ed. O.N. Likhacheva) [*Natural hazards: study, monitoring, prediction: proceedings of the II (XX) Sakhalin youth scientific school, Yuzhno-Sakhalinsk, June 4–10, 2007* (ed. O.N. Likhacheva)]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, p. 7–24.
21. Tikhonov I.N. **2009**. [*Methodology of strong earthquakes prediction by the seismicity flux on the example of northwestern part of the Pacific belt*]: [extended abstract of dissertation ... doctor of Phys. and Math. Sciences]. Yuzhno-Sakhalinsk, 41 p.
22. [Tikhonov] **2019**. *Ivan Nikolaevich Tikhonov. Problems of seismology: Selected works*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 209 p. Suppl.: 1 electronic opt. disk (DVD). doi:10.30730/978-5-6040621-4-2.2019-2
23. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012(2011)**. The current state of art in earthquake prediction, the typical precursors, and the experience in the earthquake forecasting at the Sakhalin Island and the surrounding areas. In: (Ed. Sebastiano D'Amico) *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Book 5, p. 43–79. doi:10.5772/28689
24. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017**. Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010092>
25. Vere-Jones D., Robinson R., Yang W. **2001**. Remarks on the accelerated moment release model: problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophysical J. International*, 144: 517–531. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x>
26. Wang L., Shengli Ma, Li Ma. **2008**. Accelerating moment release of acoustic emission during rock deformation in the laboratory. *Pure and Applied Geophysics*, 165(2): 181–199. doi:10.1007/s00024-008-0305-0
27. Wells D.L., Coppersmith K.J. **1994**. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. of the Seismological Society of America*, 84(4): 974–1002.
28. Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu. **2019**. Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 377–389. (In Russ, abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>

Об авторе

Родкин Михаил Владимирович (ORCID: 0000-0001-8859-1527), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН), Москва, rodkin@mitp.ru

About the Author

Mikhail V. Rodkin (ORCID: 0000-0001-8859-1527), Doctor of Physics and Mathematics, head of the laboratory, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS (IEPT RAS), Moscow, rodkin@mitp.ru