

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ОБЗОР

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>
<https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы

Л. М. Богомолов^{*1}, Н. А. Сычева²

^{*}E-mail: bleom@mail.ru

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Реферат. В обзоре изложены отраженные в научной литературе наиболее важные результаты в области прогноза сильных землетрясений. Также представлены направления дальнейших исследований и теоретические модели, которые могут стать базовыми для совершенствования прогнозных методик и алгоритмов. Прослеживается переход от первоначальной (исторической) постановки проблемы сейсмического прогноза к современным подходам к этой проблеме, основанным на данных сейсмологического и геофизического мониторинга, а также наблюдений за состоянием атмосферы и ионосферы. Обсуждаются примеры успешных предсказаний землетрясений, которые могут свидетельствовать о потенциале некоторых подходов, по крайней мере для отдельных регионов (например, для Сахалина и Камчатки). Представляется, что прогнозы, успех которых обусловлен не случайным угадыванием, а использованием определенных алгоритмов или «работающих» предвестников, могут ослабить позиции пессимистов в дискуссии о принципиальной предсказуемости или непредсказуемости землетрясений.

Ключевые слова: землетрясение, методы предсказаний, прогноз среднесрочный, краткосрочный, предвестники геофизические, сейсмологические, модель очага, разлом

Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems

Leonid M. Bogomolov^{*1}, Nailia A. Sycheva²

^{*}E-mail: bleom@mail.ru

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

Abstract. The review presents the most important results of investigations in the field of strong earthquake predictions, which were published in scientific sources. The ways of further studies of seismic prognosis problem are involved into consideration, as well as the based theoretical model, to improve predictive methods and algorithms. One can follow the research transformation from initial (historical) articulation of this intriguing problem to its current state of the art, including modern approaches based on the data of seismological and geophysical monitoring, and as well as ionospheric and atmospheric surveys. Examples of successful earthquake predictions have been discussed and treated from viewpoint of the potential of used methods, at least for some regions (for example, Sakhalin and Kamchatka). It is assumed that the predictions, which were realized due to certain algorithms and/or working precursors rather than random guessing, are able to weaken the pessimist side in the discussion: are earthquakes predictable or unpredictable in principle.

Keywords: earthquake, predictive methods, mid-term prediction, short-term prediction, geophysical, seismological precursors, source-site model, fault

Для цитирования: Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 145–182. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

For citation: Bogomolov L.M., Sycheva N.A. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 145–182. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Благодарности и финансирование

Авторы признательны коллегам В.Г. Быкову, А.С. Закупину, М.В. Родкину, А.И. Лутикову за обсуждение важных вопросов и ценные советы по работе. Выражаем благодарность Г.С. Качесовой за помощь в подготовке английской версии статьи. Авторы посвящают этот обзор памяти Ивана Николаевича Тихонова.

Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to the colleagues Victor G. Bykov, Alexander S. Zakupin, Mikhail V. Rodkin, Alexander I. Lutikov for discussing the significant issues and valuable advices on the work. We also appreciate Galina S. Kachesova's help in preparing the English version of the article. Authors dedicate this review to the memory of Ivan N. Tikhonov.

Введение

Прогноз землетрясений длительное время понимался как предсказание района (места), времени и магнитуды (энергии) ожидаемого сейсмического события [Зубков, 2002]*. Прогноз места и силы землетрясения на длительный период (долгосрочный прогноз) в настоящее время ассоциируется, как правило, с сейсмическим районированием различной степени детальности: общим сейсмическим районированием (ОСР), детальным и микросейсмическим районированием. Общее сейсмическое районирование имеет практическое значение для проектирования зданий и сооружений в сейсмически опасных регионах. Действительно, карты ОСР можно интерпретировать как вероятностный прогноз на десятилетия, т.е. наиболее длительный период из рассматриваемых сейсмологами. Оценивается максимальная интенсивность сейсмических сотрясений (в баллах) [Общее сейсмическое..., 2016]. ОСР осуществляется на основании совокупности критериев и признаков: плотности землетрясений, их энергии и интенсивности, геологических и геофизических признаков, графиков повторяемости, максимальных значений магнитуд ($M_{\max}$), сотрясаемости, сейсмической активности и других макросейсмических данных [Друмя, 1985; Shebalin, 2006; Shebalin et al., 2004; и др.].

Развитие методов сейсмического районирования, проблемы практического его проведения создали предпосылки для разработки эффективных и экономически целесообразных средств сейсмостойкого строительства, т.е. различных способов и устройств вибрационного контроля, позволяющих уменьшить сейсмические нагрузки на здания и сооружения [Арутюнян, 2010; Torunbalci, 2004]. В сейсмостойком строительстве широко применяются принципы пассивного контроля (сейсмоизоляция

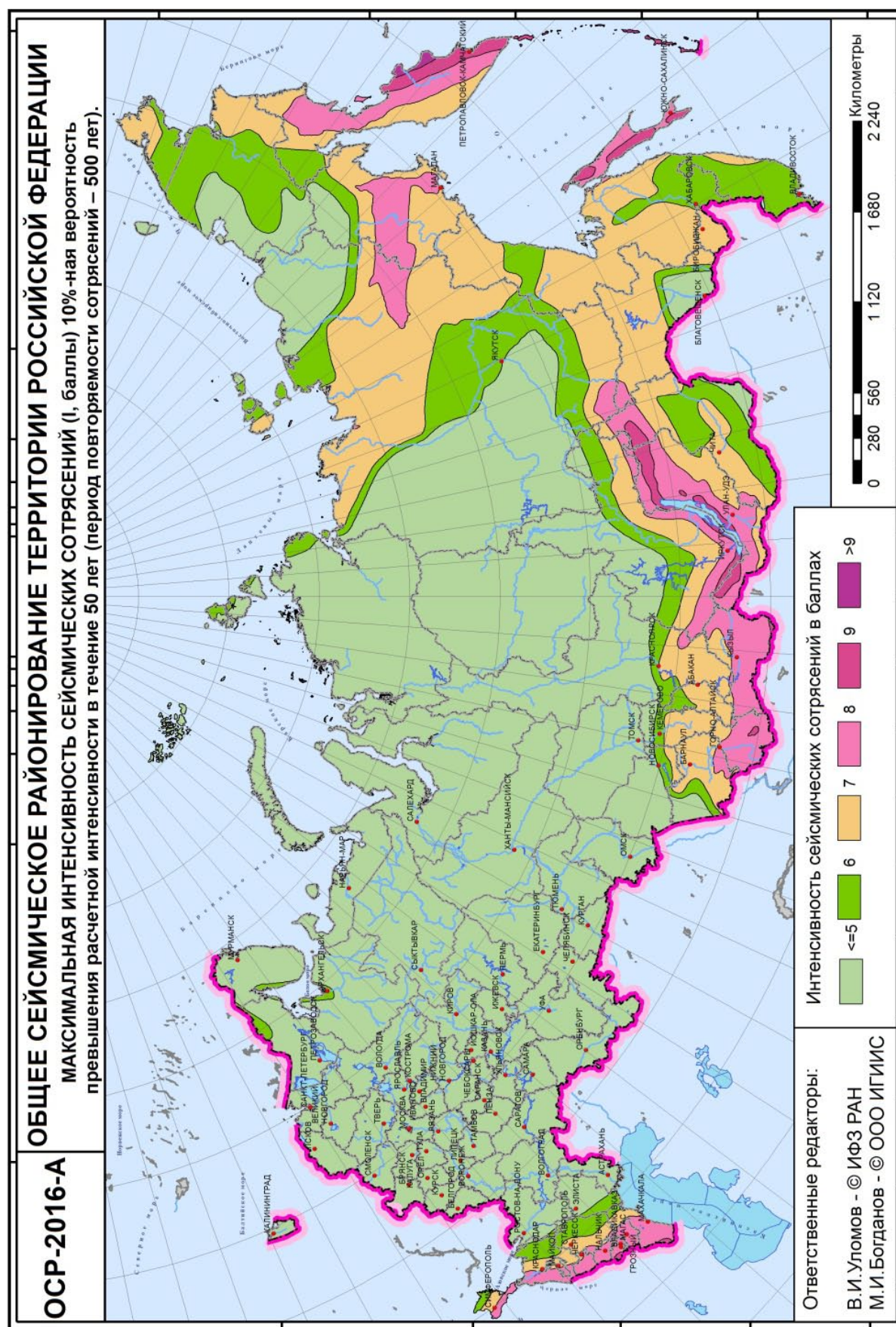
зданий от грунта). Для ответственных объектов отработаны также устройства активного контроля, включающие аппаратуру для записи колебаний грунта в режиме реального времени, силовые приводы, возбуждающие противофазные колебания конструкции, и систему управления.

После опубликования макетов карт ОСР-2012, которые должны были заменить карты ОСР-97, утвержденные руководством РАН и Госстроя России и принятые как нормативы сейсмостойкого строительства, в России развернулось их широкое обсуждение научной общественностью. В результате работ по совершенствованию и актуализации этих макетов были созданы карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (включая после 2014 г. территорию Крыма), названные картами ОСР-2016 (см. карту на рисунке). Ответственные редакторы карт ОСР-2016 – профессор В.И. Уломов (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН) и М.И. Богданов (генеральный директор ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»).

При построении карт ОСР-2016 использовались различные модели сейсмического режима, в том числе вероятностная модель, с успехом примененная в ОСР-97. В окончательном варианте карт ОСР-2016 были учтены рекомендации расширенного заседания Научного совета РАН по проблемам сейсмологии, состоявшегося 24.10.2013 г.

Детальное сейсмическое районирование и микросейсмическое районирование принимают в расчет локальные инженерно-геологические условия (свойства грунтов, уровень грунтовых вод и др.) и определяют поправки к максимальной интенсивности сейсмических сотрясений по картам ОСР. При этом величина поправки в баллах, как правило, не превышает 0.5.

* Редакция сочла целесообразным для удобства читателей применить в обзоре способ ссылок на источники в форме указания фамилии автора и года опубликования работы.



Карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016-А: максимальная интенсивность сейсмических сотрясений (в баллах) с допуском 10%-й вероятности превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет (период повторяемости землетрясений 500 лет) [Общее сейсмическое..., 2016].

Прогноз времени сейсмического события выделился в самостоятельную проблему, связанную как с изучением предвестников землетрясений (феноменологические подходы), так и с разработкой адекватных моделей сейсмического очага.

Эта проблема остается одним из главных вызовов перед науками о Земле, а ее фундаментальность рельефно проявилась в дискуссии о принципиальной предсказуемости или непредсказуемости землетрясений, инициированной в 1990-е годы работами Р. Геллера [Geller, 1991, 1996, 1997; Geller et al., 1997]. В ходе дискуссии отмечено, что проблема прогноза содержит как научную, так и социально-экономическую составляющую [Snieder, van Eck, 1997]. Социальные и экономические аспекты со временем могут трансформироваться, что влияет на оценку прогнозов и их практическую значимость. Это, однако, не входит в задачи данного обзора. С точки зрения научной составляющей можно отметить, что критика выявления предвестников землетрясения базировалась в значительной степени на опыте наблюдений аномалий геофизических полей в Японии и Греции, в частности по геодезическим данным и электротеллурическим потенциалам (VAN метод) [Geller, 1996]. Однако выводы об отсутствии достоверных предвестников не могут переноситься автоматически на все ситуации, включая исследования в других регионах и применение новых методов. Сомнения в возможности прогноза землетрясений усугубились под влиянием известных положений нелинейной динамики систем (расходимость фазовых траекторий, неустойчивость при изменении начальных условий [Короновский, Наймарк, 2012; Короновский и др., 2019]) и концепции самоорганизованной критичности (иногда называемой третьим поколением синергетики [Малинецкий, Подлазов, 1997; Bak, Tang, 1989]). Применение этой концепции к анализу природных катастроф выделило такие непредсказуемые сценарии, как, например, модель sand pile («кучи песка») [Bak, Tang, 1989]. Однако гипотеза о соответствии потока сейсмических событий моделям самоорганизованной критичности не доказана. Зато известны примеры явного несоответствия реальной сейсмичности таким моделям (прецеденты удачных прогнозов землетрясений [Shebalin et al., 2004; Wang et al., 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]).

Предыстория: о прогнозе и предвестниках землетрясений

История исследований по проблеме прогноза времени возникновения землетрясений и предвестников в качестве научной задачи охватывает более полувека. Этот период, с одной стороны, характеризуется лавинообразным накоплением данных о предвестниках землетрясений, особенно в начальный период времени (1960–1970-е годы), с другой – весьма ограниченной возможностью их использования в реальном прогнозе.

Активный поиск и исследования предвестников землетрясений начались с крупных землетрясений в начале XX в., которые принесли гибель людям и целым городам. Среди самых страшных из них – землетрясение в Китае (16.12.1920, $M = 7.8$), унесшее жизни более 200 тыс. людей; в Японии (01.09.1923, $M = 8.3$), во время которого погибли более 100 тыс. человек; на территории Туркмении катастрофическое Ашхабадское землетрясение (06.10.1948, $M = 7.3$), полностью разрушившее город и лишившее жизни более 100 тыс. человек.

После этих разрушительных землетрясений во многих странах мира – в Японии, США, КНР, бывшем СССР – начались работы по организации прогнозных исследований. В бывшем СССР Ашхабадское землетрясение сделало проблему прогноза таких грозных природных явлений одной из актуальнейших в стране. Под руководством академика Г.А. Гамбурцева была развернута программа исследований по прогнозу землетрясений. Ему удалось создать настолько всеобъемлющую, глубоко продуманную и научно обоснованную программу, что и по сей день она не утратила своего значения как руководства к осуществлению практически значимого прогноза землетрясений [Певнев, 2015]. Основные представления Гамбурцева о состоянии и перспективах работ по этой проблеме были сформулированы в статье [Гамбурцев, 1957] и последующих его работах (см. [Певнев, 2015, 2016]).

Программа Гамбурцева базировалась на представлении, что в процессе своего развития земная кора расчленялась на относительно прочные блоки, разделенные ослабленными зонами – сейсмическими швами (разломами). Медленные относительные смещения этих блоков приводят к накоплению сдвига-

вых напряжений и их концентрации в определенных местах шва. Там, где напряжения превосходят предел прочности, возникают очаги землетрясений.

К первым достойным публикациям по данной проблеме, согласно [Зубков, 2002], можно отнести исследования предвестников по движению земной коры [Reid (ed.), 1910; Мещеряков, 1968; Такаги и др., 1984]; по извержениям вулканов [Такаги и др., 1984]; по уровню моря [Рикитакэ, 1979]; уровню подземных вод [Cable, 1965]; по атмосферному электричеству [Бончковский, 1954]; по геоакустической активности [Анциферов, 1969]; вариациям сейсмического режима [Мамадалиев, 1964; Кейлис-Борок, Малиновская, 1966; Кособоков, Ротвайн, 1977]; ориентации осей напряжений в очагах слабых землетрясений перед сильным землетрясением [Симбирева и др., 1974]; дебиту источников подземных вод [Смирнова, 1971]; предвестников геомагнитных [Kato, Utashiro, 1949]; импульсных электромагнитных [Воробьев и др., 1976; Гохберг и др., 1979]; метеорологических [Рикитакэ, 1979]; гравитационных [Fujii, 1966]; термических [Уломов, 1971; Милькис, 1986]; радоновых [Барсуков, 1970; Уломов, Мавашев, 1971]; электротеллурических [Соболев, Морозов, 1970].

Во второй половине XX – начале XXI в. состояние проблемы прогноза землетрясений обсуждалось в известных монографиях: «Предсказание землетрясений» [Рикитакэ, 1979; Моги, 1988], «Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии» [Такаги и др., 1984], «Предвестники землетрясений» [Сидорин, 1992; Зубков, 2002], «Основы прогноза землетрясений» [Соболев, 1993], «Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация» [Завьялов, 2006], «Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий» [Тихонов, 2006].

Было получено множество результатов, однако среди них не удалось выявить аномалии – вариации, которые можно интерпретировать как однозначные признаки ожидаемого сильного землетрясения. Вариации геофизических и других полей – гипотетические предвестники – регистрировались на фоне шума, сопровождающего геотектонический процесс [Зубков, 2002; Кособоков, 2005]. В таких условиях кроме вариаций, связанных с под-

готовкой очага землетрясения, отмечались вариации тех же полей и в асейсмичный период, условно называемые ложными тревогами. Это обстоятельство в ряде работ расценивалось как неудача прогноза [Друмя, 1985; Гуфельд и др., 2011].

Оно дало повод для скептического вывода, сформулированного в работе [Певнев, 2015], про ошибочность выбранной стратегии решения проблемы прогноза места готовящегося очага землетрясения. Это заключение относится к использованию в целях прогноза «методов решения обратных задач (распознавания образа) по разрозненным косвенным признакам – аномалиям в различных полях: сейсмических, деформационных, гидрогеологических, геохимических, электромагнитных и многих др.» [Певнев, 2015, с. 195]. Альтернативные методы, т.е. прямая задача обнаружения места и времени землетрясения по признакам, которые с необходимостью возникают при формировании очага, требуют развития адекватных геомеханических моделей. Но эта проблема, по-видимому, еще сложнее прогноза землетрясений, ее решение может затянуться на длительное время. Быстрое совершенствование методов решения обратных задач позволяет надеяться на продвижение в проблеме прогноза, а возможно, и на практически значимые результаты (хотя прогнозы будут оставаться вероятностными). Поэтому трудно согласиться с вышеизложенным заключением.

Произошедшие в конце прошлого века катастрофические землетрясения в Китае, Италии, Японии, Иране, США (в Калифорнии), в Турции и на территории бывшего СССР в Спитаке и Нефтегорске возобновили интерес к исследованию задачи прогноза землетрясений [Кособоков, 2005; Завьялов, 2006; Тихонов, 2006].

В США проблема прогноза землетрясений была поднята в середине 1960-х годов. Совместно с Японией было проведено множество конференций, но никаких серьезных результатов не последовало вплоть до создания в 1977 г. Национальной программы снижения опасности землетрясений (National Earthquake Hazards Reduction Program) [Scholz, 1997]. Одной из ее задач стала разработка методов прогноза землетрясений и систем раннего предупреждения.

В 1984 г. стартовал Паркфильдский эксперимент [Bakun et al., 2005], постановка которого опиралась на квазипериодичность возникновения землетрясений на данном участке разлома Сан-Андреас (Калифорния, США). Однако и этот эксперимент не позволил правильно спрогнозировать время очередного землетрясения [Roeloffs, Langbein, 1994]. В 1990 г. акценты были смещены с прогноза на смягчение ущерба [Mervis, 1990]. В 1995 г. Национальная академия наук провела коллоквиум «Прогноз землетрясений: вызов для науки», который не смог дать никакой новой информации для предсказаний [Knopoff, 1996].

В Японии программа по предсказанию землетрясений началась в 1964 г. [Bormann, 2011] пятилетним планом [Rikitake, 1966]. В 1978 г. программа занялась прогнозом землетрясений с $M > 8$. Длительное время выполняются наблюдения за районом вблизи Токио, где 01.09.1923 произошло разрушительное землетрясение, $M = 8.3$. На этом небольшом участке вплоть до землетрясения в Кобе (17.01.1995, $M = 7.3$) были сосредоточены основные исследования японских сейсмологов. После 1994 г. в Японии было резко усилено финансирование сейсмологических исследований, создана одна из наиболее плотных сетей сейсмических и GPS-станций (расстояние между станциями 50–100 км). Данные этой сети были использованы [Tikhonov, Rodkin, 2012] для среднесрочного прогноза землетрясения Токачи-оки (26.09.2003, $M_w^* = 7.3$), который оправдался частично. В самой Японии не было сделано предсказаний этого землетрясения. В настоящее время основные усилия японских сейсмологов направлены на выявление на контактах плит участков с неоднородностями (asperities, дословно шероховатостями [Кочарян, 2016]), которые, по их мнению, являются потенциальным источником их «зацепления» и, следовательно, фактором, определяющим последующее накопление уровня напряжений.

В Китае после успешного прогноза землетрясения в окрестности г. Хайченг (04.02.1975, $M = 7.3$) произошло катастрофическое Таншаньское землетрясение (18.07.1976, $M = 7.3$), не проявившееся в ряде предвестников (форшоки и др.), за которыми осуществлялось слежение. Вслед за Японией и США в Китае наращиваются сети сейсмологических и геофизических

станций с целью изучения физических полей сейсмоактивных областей. После мощного землетрясения в китайской провинции Сычуань в 2013 г. было решено вложить в прогноз сейсмических ударов более 300 млн долл. для создания в наиболее опасных районах страны сети из 5000 станций наблюдения, цель которых – раннее предупреждение о сильном землетрясении (<https://www.epochtimes.ru/kitaj-sozdast-sistemu-ekstrennogoopoveshheniyao-zemletryaseniyah-99035049/#/>).

В России в 90-х годах прошлого столетия после распада СССР и фактического прекращения финансирования научных исследований были существенно свернуты комплексные исследования сейсмоактивных областей (утрачены не только геофизические полигоны в Гарме и Талгаре, но и, частично, собранные данные). Это предопределило угасание интереса к проблеме изучения процесса деформирования, происходящего в области будущего очага землетрясения. Основной упор в прогнозе землетрясений стал делаться на поиск в основном косвенных геофизических предвестников и статистический анализ закономерностей сейсмического режима [Соболев, Морозов, 1970; Kossobokov et al., 1990; Соболев, 2003; Рогожин и др., 2011; Sobolev et al., 1991]. Отыскиваются либо области сейсмического затишья [Ружич, 1996], либо, наоборот, области повышенной концентрации сейсмичности [Завьялов, 1986].

Классификация прогнозов и предвестников землетрясений

Накопленный огромный материал по предвестникам землетрясений в определенной степени систематизирован, и в настоящее время существует несколько классификаций предвестников. В 2011 г. Е.А. Рогожин на конференции «Прогноз землетрясений: готова ли к ним Россия и мир?» заявил, что слабой стороной изучения предвестников является то, что нет никакой специальной службы в нашей стране, которая вела бы комплексное наблюдение за всеми предвестниками. В этих условиях все имеющиеся классификации предвестников, как и видов прогноза, несколько условны.

В зависимости от времени проявления предвестника относительно момента землетрясения прогнозы разделяются на долго-

* Обозначения магнитуд в обзоре соответствуют обозначениям их в источниках.

срочные, среднесрочные и краткосрочные. Следует отметить, что на практике подобное разделение достаточно условно, особенно это относится к краткосрочным и среднесрочным предвестникам.

Долгосрочный прогноз основывается на особенностях геодинамических процессов в регионе, проявляющихся как изменения напряженно-деформированного состояния земной коры и связанные с этим изменения сейсмического режима (такие как появление зон сейсмического затишья, вариации скоростей проходящих сейсмических волн). Долгосрочным признаком подготовки очага землетрясения также может быть консолидация блоков земной коры и сопутствующее увеличение радиуса корреляций сейсмических событий. Как было упомянуто, функцию долгосрочного прогноза места и силы землетрясения фактически выполняет сейсмическое районирование.

Среднесрочный прогноз дает возможность получить предупреждение о сейсмическом событии от нескольких недель или месяцев до нескольких лет. Этот прогностический уровень предполагает сценарий развития процесса разрушения по данным сейсмологического мониторинга, а также текущих наблюдений за геофизическими полями, изменениями наклонов земной поверхности, режимных наблюдений над дебитом и химическим составом водных источников и глубоких водяных, нефтяных и газовых скважин. Используются формализованные критерии оценки статистической значимости каждого из возможных предвестников и их комплекса.

Теоретической основой представлений о среднесрочных предвестниках являются модели, описывающие существенное увеличение неупругой деформации (в частности, дилатансии, т.е. возрастания объема при деформации сдвига) по месту будущего очага и в окружающей его зоне. Наиболее известные модели: скачкообразного скольжения блоков (stick-slip), лавинно-неустойчивого трещинообразования и дилатантно-диффузионная модель [Соболев, 1993; Scholz, 2002]. Взаимосвязь между размерами очага и расстоянием, на котором могут появиться предвестники, проанализирована в обобщении [Добровольский, 1991]. В этой работе была предложена консолидационная модель очага и на ее основе получены количественные оценки упомянутых расстояний. Для времени ожидаемого со-

бытия подобных оценок не получено. В этой ситуации устанавливаются феноменологические связи между параметрами предвестников и землетрясениями, которые в дальнейшем используются для оценки места и магнитуды ожидаемого землетрясения [Друмя, 1985; Моргунов, 1999; Tikhonov, Rodkin, 2012]. Но время события прогнозируется в течение характерного интервала длительностью до нескольких лет. Среднесрочные прогнозы открывают возможность для уточнения оценок времени события, т.е. для многоэтапного прогноза на основе дополнительных данных для выделенного «тревожного» региона (см. ниже).

Краткосрочный прогноз – прогноз с заблаговременностью от нескольких суток до нескольких недель до события. Считается, что при этом могут сохранять силу вышеописанные методы [Друмя, 1985; Моргунов, 1999]. Вместе с тем особо значимыми становятся активизации процесса изменения напряженно-деформированного состояния (в частности, форшоковые серии). Различные краткосрочные предвестники: сейсмологические, электромагнитные, гидрогеохимические и др. (в зависимости от метода наблюдений, см. ниже) опираются на специализированные физические модели, общая модель их возникновения вряд ли может быть разработана. Так, например, широко распространенная модель сейсмoeлектрических взаимосвязей [Hayakawa, Molchanov (eds), 2002] объясняет возбуждение электромагнитного поля перед землетрясением разделением зарядов на контактной поверхности, вдоль которой произойдет сейсмическая подвижка.

Именно краткосрочный прогноз оказался в фокусе дискуссии о возможности или невозможности предсказания землетрясений по наблюдаемым предвестникам [Соболев, 1993]. Аргументация о практической невозможности краткосрочных прогнозов была представлена в работах [Короновский, Наймарк, 2012; Короновский и др., 2019; Geller, 1997; Geller et al., 1997; Gufeld et al., 2011; Snieder, van Eck, 1997]. Но также известны и работы с обнадеживающими результатами о краткосрочных прогнозах [Моргунов, 1999; Гаврилов, 2007; Щекотов и др., 2015; Тихонов и др., 2017; Hayakawa et al., 1996; Rozhnoi et al., 2009].

Сверхкраткосрочный (оперативный) прогноз с временем опережения от нескольких секунд до нескольких часов рассматривается

в некоторых работах как предельный случай краткосрочного прогноза [Паровышиный и др., 2015]. Фактически, подходы к оперативному прогнозу решают ту же задачу, что и методы раннего обнаружения подвижек в сейсмическом очаге. Сверхкраткосрочные прогнозы актуальны в связи с выводами нелинейной динамики о наличии «горизонта прогнозов», за которым детерминированное описание поведения сложных динамических систем невозможно [Малинецкий, Подлазов, 1997]. Для зон очагов землетрясений за горизонтом предсказуемости могут оказаться периоды ожидания события длительностью порядка недели, как у краткосрочных прогнозов [Короновский, Наймарк, 2012]. При этом среднесрочные прогнозы отражают не само приближение разрыва, но сопутствующие синхронные процессы.

Методы, на основе которых происходит изучение предвестников землетрясений, обычно подразделяют на геологические, геофизические, гидрогеохимические, биологические, геомеханические, сейсмологические и биофизические.

Геологическими методами изучают разломы и трещиноватость пород как один из факторов, который определяет возможное место будущего землетрясения.

Геофизическими методами оценивается плотность, электропроводность, магнитная восприимчивость, скорости продольных и поперечных волн, изменение напряженности электротеллурического и геомагнитного полей и т.д. Особая группа геофизических методов – ионосферные [Бучаченко и др., 1996; Molchanov, Hayakawa, 2007], которыми в период перед землетрясениями анализируются изменение полного электронного содержания, изменение параметров проходящих радиоволн и другие вариации.

Гидрогеохимические методы основаны на измерении содержания химических элементов в грунтовых и скважинных водах. Определяется содержание радона, гелия, фтора, кремнистой кислоты и других элементов. Их концентрации могут служить наиболее характерными предвестниками предстоящих землетрясений.

Геомеханические предвестники связаны с деформацией горных пород, движением блоков и мегаблоков в сейсмоактивных регионах.

К *сейсмологическим* методам выявления предвестников можно отнести определение

отношения скоростей продольных и поперечных волн, отношения амплитуд различных типов волн, определение коэффициентов поглощения и рассеивания, вычисление частоты проявления микроземлетрясений, выделение зон временной активности и затишья. В эту же группу предвестников естественно относить и более сложные параметры, которые рассчитываются по сейсмологическим данным: параметр сейсмогенных разрывов $K_{ср}$ [Завьялов, 2006], характеристики корреляций с фазами лунно-солнечных приливов [Салтыков, 2016], параметры упорядоченности низкочастотного сейсмического шума [Любушин, 2011] и др.

Биологические и биофизические предвестники связывают с проявлениями необычного поведения животных, которое, предположительно, вызвано изменениями геофизических полей. Эти предвестники предполагают изменения в биосфере (в частности, в поведении некоторых объектов) при аномалиях геофизических полей Земли перед землетрясением. Примером таких аномалий могут служить характеристики естественного электрического поля в атмосфере. Вопрос о достоверности для биофизических (биологических) предвестников еще более спорный, чем для других.

Сейсмологические параметры по степени значимости образуют следующий ряд:

- Параметр, определяемый по пересечению осей сжатия в очагах заглубленных форшоков и указывающий на место очага готовящегося землетрясения [Захарова, Рогожин, 2000, 2001, 2004];
- Параметр, характеризующий напряженное состояние среды по определению тензора сейсмического момента (Centroid Moment Tensor) [Юнга, 1996, 1999];
- RTL-параметр, основанный на выделении аномалии сейсмического затишья по трем характеризующим сейсмический режим функциям: эпицентральной R , временной T и энергетической L [Соболев, Тюпкин, 1996, 1998];
- Параметры потока сейсмических событий, используемые в алгоритмах «Магнитуда 8» (M8) и «Сценарий Мендосино» (MSc) [Kossobokov et al., 1990];
- Параметр S для форшоковой активизации [Соболев, 1993, 1999].

Используя комплекс наиболее достоверных долгосрочных, среднесрочных и кратко-

срочных сейсмологических предвестников, можно на практике осуществлять мониторинг потенциальных очаговых зон и оценивать оперативную обстановку, выявлять периоды повышенной вероятности землетрясений.

«Работоспособность» геофизических предвестников доказана на примере успешного предсказания Кроноцкого землетрясения 05.12.1997, $M_w = 7.8$ [Завьялов, 2006]. Это землетрясение произошло в Камчатской области, хорошо обеспеченной системами геофизических и геохимических наблюдений за прогнозными признаками.

В работе [Любушин, 2011] дана среднесрочная оценка сейсмической опасности для большей части территории Японии по параметрам микросейсмического шума (возбужденного за счет разгрузки природных газов [Осика, 1981; Войтов, Добровольский, 1994; Гуфельд и др., 2010]). А.А. Любушин указал на повышенную вероятность возникновения землетрясения в этом районе после 2010 г., т.е. в канун мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011, $M = 8.9$ – 9.1 .

Важным примером применения эффективных прогнозных методов является ряд успешных среднесрочных прогнозов землетрясений на Сахалине, выданных И.Н. Тихоновым. Методом сейсмического затишья (выявления сейсмической брешы II рода) в 2006 г. был сделан среднесрочный прогноз землетрясения на юго-западном шельфе Сахалина, который реализовался в Невельском землетрясении 02.08.2007, $M = 6.2$ [Tikhonov, Kim, 2010]. Также был выдан прогноз Такойского роя землетрясений, июль–сентябрь 2001 г., с наиболее сильным событием 01.09.2001, $M = 5.6$ [Тихонов, 2001, 2002], и землетрясения Токачи-Оки 26.09.2003, $M = 8.0$, $M_w = 7.3$ у о. Хоккайдо, Япония [Тихонов, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012].

Для Невельского землетрясения 02.08.2007 Тихонову удалось сделать успешный краткосрочный прогноз на основе подходов Б. Войта (B. Voight), Д. Варнеса (D. Varnes) и модели саморазвивающихся процессов А.И. Малышева (близкой к описанию «режимов с обострением» в концепции синергетики). Во всех этих подходах быстрое, взрывное нарастание активности форшоков считается краткосрочным предвестником землетрясения.

Позже в обобщении [Тихонов и др., 2017] было выполнено ретроспективное моделирова-

ние последовательностей слабых ($M \sim 2.0$ – 3.0) мелкофокусных землетрясений юга Сахалина за период 2003–2014 гг. по методу саморазвивающихся процессов на основе данных каталога локальной сети. Построены математические модели нелинейного нарастания кумулятивной суммы числа толчков перед сильными ($M = 4.6$ – 6.2) событиями. Получены краткосрочные прогнозные оценки параметра T_0 (времени возникновения сильных толчков) с высокой степенью точности. Показана устойчивость получаемых решений при варьировании длительности интервала обработки данных каталога. Для дальнейших исследований немаловажно, что в обобщении [Тихонов и др., 2017] прогнозы формулировались и проверялись с учетом технических требований Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям. Эти требования к заблаговременности и интервалу магнитуд были несколько мягче тех, которые выдвигались в период оптимизма в XX в., т.е. допускались более широкие интервалы для времени и магнитуды прогнозируемого события. Если использовать «практичные», хотя и компромиссные требования к оценке прогнозов И.Н. Тихонова, можно заметить, что для них полностью соблюдается принцип проверки гипотетических прогнозов землетрясений, подобный описанному в работах [Evison, Rhoades, 1993, 1997].

Наличие нескольких удачных прогнозов землетрясений в южной части Сахалина и прилегающих акваториях можно увязывать с более или менее однородным (в сравнении с другими сейсмоопасными зонами) распределением направлений главных сжатия и растяжения вдоль протяженных разломов: Западно-Сахалинского и Центрально-Сахалинского [Тамбурова, 2015; Сим и др., 2017, 2020]. В цитированных работах результат об упорядоченности (меньшей неоднородности) был получен по данным о структурно-геоморфологических и сейсмологических индикаторах напряженного состояния коры.

Упорядоченность поля напряжений – благоприятный фактор для развития новых или адаптации имеющихся методов (алгоритмов) прогноза землетрясений. Показательным примером можно считать разработанный в ИМГиГ ДВО РАН алгоритм SeisASZ [Закупин, 2016] для среднесрочного прогноза землетрясений по аномалиям параметра LURR

(load to unload response ratio), описывающего различие прироста деформации Бенъоффа в периоды двух разных фаз лунных приливов [Yin, Yin, 1991; Lockner, Beeler, 1999; Yin et al., 2001]. А.В. Николаевым параметр LURR был введен при анализе триггерного влияния лунно-солнечных приливов [Николаев, 1994; Природные... , 2000]. Китайскими сейсмологами было предложено использовать аномалии этого отношения (значительное отличие от единицы, т.е. значения, соответствующего упругой или вязко-упругой среде) в качестве прогнозного параметра [Yin et al., 1995]. Аномальные значения параметра LURR, т.е. значительное различие реакций среды на добавку и уменьшение нагрузки, указывают на стадию неупругой деформации среды в области готовящегося очага землетрясения и возникновения зоны запредельного деформирования [Закупин и др., 2020; Ребецкий, 2021]. Собственно, этот режим деформации и является признаком будущего землетрясения. По мере дальнейшего приближения к разрушению происходит локализация неупругой (запредельной) деформации, и параметр LURR, вычисляемый для большого охватывающего объема, возвращается к обычным значениям. Как показано в работах А.С. Закупина, сильные землетрясения на Сахалине происходят в сроки, не превышающие 2 лет после завершения аномалии параметра LURR [Закупин, 2016, Закупин и др., 2018]. С помощью алгоритма SeisASZ в оперативном режиме (не ретроспективно) были выявлены две зоны, где прогнозировались землетрясения. Впоследствии в них произошли землетрясения: Онорское, 14.08.2016, $M_w = 5.8$, и Крильонское, 23.04.2017, $M = 5.0$. Предсказанные значения времени и магнитуды соответствовали наблюдаемым [Закупин, Семенова, 2018]. На заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям оба прогноза были признаны реализованными. Таким образом, с помощью нового метода была подтверждена возможность прогноза землетрясений в южной части о. Сахалин, которая ранее отмечена в работах И.Н. Тихонова [Тихонов, 2006, 2009; Tikhonov, Rodkin, 2012] как удивительный прецедент предсказуемости. Параметр LURR может считаться одним из эффективных среднесрочных предвестников.

Относительно ионосферных предвестников можно упомянуть промежуточный результат – разработку в Институте прикладной геофизики (Росгидромет) комплексного метода анализа предвестников землетрясений, который использует спутниковые и наземные измерения полного электронного содержания ионосферы, температуры в нижних слоях атмосферы и ряда других параметров для выделения признаков приближения толчков. На данном этапе с помощью этой системы для землетрясений с $M > 5.5$ удавалось предсказывать время события с упреждением до пяти суток, причем место ожидаемого события считалось известным или надежно прогнозируемым другими методами. По статистике оправдывается около 60 % таких ионосферных прогнозов (Служба прогноза землетрясений, <https://ecoportal.su/news/view/70133.html>). Предположительно, в дальнейшем возможно усовершенствование этой системы для краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

Специалистами Сибирского отделения РАН и Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья в 2012 г. был разработан метод активного мониторинга, при котором используются мощные вибрационные источники, создающие возмущения с амплитудой нагрузки до 100 т. Такие вибрационные источники позволяют получать данные о строении земной коры и, в перспективе, воздействовать на очаги готовящихся землетрясений для управляемой разрядки напряжений, т.е. инициировать слабые землетрясения и получать прогнозную информацию о вероятности сильных.

В завершение обзора подходов к прогнозу землетрясений приведем известные случаи заблаговременных прогнозов сильных землетрясений ($M > 5.5$), которые впоследствии подтвердились и поэтому считаются успешными (см. таблицу). В таблицу также включены 3 ретроспективных прогноза, сделанные в конце XX – начале XXI в., которые имели важное значение: они продемонстрировали, что критика достоверности предвестников землетрясения [Geller, 1991, 1997] может быть преодолена или существенно ослаблена.

Хотя количество успешных прогнозов, сделанных в реальном времени, невелико, но оно заведомо больше того, которое могло получиться при случайном угадывании. Это оз-

начает несостоятельность или, по крайней мере, ограниченность представлений о принципиальной непредсказуемости землетрясений. Большинство указанных в таблице прогнозов – среднесрочные. Краткосрочные прогнозы Хайченгского и Невельского землетрясений были сделаны после среднесрочных прогнозов, т.е. как уточнение при многоэтапном прогнозировании. Для всех 11 примеров удачных прогнозов землетрясений использовались различные сейсмологические предвестники, они сыграли ключевую роль для прогнозов, сделанных в режиме реального времени. Примеры прогнозов

землетрясений Токачи-оки, 2003 и Шикотанского, 1994 могут свидетельствовать о «работоспособности» алгоритмов M8 и MSc, хотя для практики крайне желательна более высокая эффективность.

Таблица свидетельствует, что результативность сейсмологических методов прогноза оказалась выше, чем других методов: геофизических (включая новейшие, ионосферные методы), геологических, гидрогеохимических. Так что ошибочным можно считать утверждение, что развитие современных сейсмических сетей не дало продвижения в этой области.

Таблица. Удачные прогнозы землетрясений с магнитудой $M > 5.5$

Дата	M	Название (место), страна	Вид прогноза, прогностические параметры. Литературный источник
04.02.1975	7.3	Хайченгское, Хайченг, Китай	<i>Форшоковые последовательности и другие аномалии.</i> Многоэтапный прогноз, включая краткосрочный. Долгое время это землетрясение считалось единственным прецедентом прогноза, в результате которого были своевременно поданы сигналы тревоги, стал очевидным факт спасения людей, покинувших здания [Raleigh et al., 1977; Wang et al., 2006]
16.08.1976	7.2	Сонгнан, Китай	<i>Форшоковые последовательности.</i> Многоэтапный прогноз [Raleigh et al., 1977; Jones et al., 1984]
29.05.1975	7.3	Лонглинг, Китай	<i>Форшоковые последовательности.</i> Успешные прогнозы землетрясений Сонгнан и Лонглинг оставались как бы в тени события Хайченг, поскольку в данном случае тревога не объявлялась. Они важны как подтверждение, что Хайченг – не уникальный случай [Raleigh et al., 1977]
04.10.1994	8.1	Шикотанское, Южные Курильские о-ва, Россия	<i>Предсказано с помощью алгоритма M8</i> в Институте теории прогноза землетрясений РАН [Kossobokov et al., 1990] и, независимо, в ИМГиГ ДВО РАН [Tikhonov, Rodkin, 2012].
05.12.1997	7.7	Кроноцкое, Камчатка, Россия	Ретроспективный [Завьялов, 2006]
25.09.2003	7.3	Токачи-оки, Хоккайдо, Япония	Ретроспективный [Shebalin et al., 2004; Тихонов, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]
15.11.2006	8.3	Симуширское, Курило-Охотский регион, Россия	Долгосрочный [Федотов, 2005] Ретроспективный [Тихонов и др., 2008; Shebalin, 2006]
02.08.2007	6.1	Невельское, Сахалин, Россия	Среднесрочный прогноз по <i>появлению сейсмической бреши II рода</i> и краткосрочный прогноз по <i>нарастанию форшоковой активности</i> [Левин и др., 2007, 2007а; Тихонов, 2009; Tikhonov, Kim, 2008, 2010]
11.03.2011	9.1	Тохоку, Япония	Среднесрочный, по характеристикам <i>сейсмического шума</i> [Любушин, 2011]
30.01.2016	7.2	Жупановское землетрясение, Камчатка, Россия	<i>Сейсмологические, геофизические, геохимические предвестники.</i> Признаны успешными 3 прогноза разных авторов, сделанные в реальном времени [Болдина, Копылова, 2017; Ларионов и др., 2017; Фирстов и др., 2017; Gavrilov et al., 2020]
14.08.2016	5.8	Онорское, Сахалин, Россия	Среднесрочный прогноз по <i>параметру LURR</i> [Закупин и др., 2018]

Современные подходы к проблеме прогноза землетрясений

Несмотря на многолетний опыт использования данных о различных предвестниках землетрясений, задача прогнозирования времени землетрясений не решена. С одной стороны, накоплен огромный материал по проявлению различных предвестников и есть отдельные удаchi, но с другой – в 90 % случаев сильное землетрясение возникает неожиданно. Такой результат показывает, что наши представления о механизме генерации землетрясений пока далеки от модели реального природного процесса (здесь надо согласиться с авторами работы [Bakun et al., 2005]). Многие представления о процессе подготовки землетрясения заимствованы из механики и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон [Ребецкий, 2008].

Таким образом, при всем обилии проведенных и проанализированных наблюдений, место, время и магнитуда будущих разрушительных землетрясений даже в хорошо изученных регионах по-прежнему оказываются неожиданными. Тем не менее необходимо собирать новые, дополнительные данные. Но какие? Комплекс возможных параметров в том или ином многопризнаковом факторе можно варьировать и расширять беспредельно, однако рамки реальных возможностей заставляют как-то его ограничивать.

Многие исследователи предлагают свой путь исследования проблемы прогноза землетрясений.

Некоторые [Гольдин и др., 2001] главную научную проблему видят в том, что процесс подготовки землетрясений (тем более разные возможные его сценарии) недостаточно понят. Главная цель нового этапа мониторинговых исследований – это получение данных в очаговых зонах. Эти данные будут способствовать и более полному пониманию геодинамических процессов, заканчивающихся землетрясением, и построению теории физики очаговых зон.

Другие [Певнев, 2015] считают, что попытки решить проблему прогноза землетрясений без использования каких-либо моделей подготовки и реализации очагов землетрясений, методами обратных задач с помощью измерения и анализа разнородных аномалий в различных геофизических и других полях,

не увенчались успехом из-за некорректности постановки задач. А в работе [Певнев, 2016] представлены основные положения деформационной модели подготовки очага корового землетрясения (подтвердившей рациональность гамбургского пути к прогнозу коровых землетрясений), а также выводы из этой модели. Эти выводы позволяют сделать обоснованное заключение о том, что изучение деформаций земной поверхности геодезическими методами позволяет осуществлять точный прогноз места очага готовящегося землетрясения, а также определять максимальную силу, которую он способен породить. Для реализации этого прогноза необходимо на выбранном по тем или иным соображениям участке сейсмогенной зоны создать геодезическое построение, позволяющее с необходимой точностью определять вид деформаций земной поверхности на исследуемом участке, т.е. достоверно устанавливать вид упругого изгиба горных пород в случае, если на этом участке идет процесс подготовки очага землетрясения. В этой работе также рассматриваются такие вопросы, как прогноз силы и времени землетрясения, и предлагаются пути решения этих задач.

Согласно [Киссин, 2013], землетрясения необходимо рассматривать как систему, которая является частью более крупной системы – геодинамических процессов. Изучение этого природного явления требует системного подхода с целью выявления наиболее важных причинно-следственных связей. Для получения знаний, достаточных для осуществления практического прогноза, требуются комплексные исследования по двум основным направлениям:

- геосреда, ее структура, неоднородность и прочностные свойства, выделение участков, подверженных сейсмическим деформациям;
- характер напряженно-деформированного состояния геосреды; факторы, на него влияющие; тектонические напряжения, их распределение и изменения по силе и параметрам.

Первое направление – исследование среды, ее свойств и топологии с позиции построения формализованных теорий подготовки землетрясения – позволяет получить априорную информацию, необходимую для выделения объекта исследования из окружающей среды, а также информацию о структурном строении среды и объекта исследований – зоны форми-

рования очага. Согласно концепции геофизической среды М.А. Садовского [Садовский, 1986], которая в настоящее время является общепризнанной, геосреда имеет блоковое иерархическое самоподобное строение, которое и определяет возможность среды накапливать, перераспределять, поглощать и излучать энергию. Именно такие особенности строения среды определяют специфику сейсмических процессов [Садовский, Писаренко, 1991].

Геосреда обладает ярко выраженной неоднородностью, которая определяется литологией, тектоникой и двухфазностью (наличием флюидов) [Kissin, 1997]. Литологическая неоднородность среды обуславливает резкие различия в механических и прочностных свойствах пород в области формирующегося очага, которые могут достигать до 2–3 порядков по величине (например, для модуля Юнга). Поэтому сейсмический процесс и его подготовка будут иметь свои особенности для очагов, расположенных в глубоких частях мощного осадочного покрова, по сравнению с очагами в консолидированной коре, представленной кристаллическими породами.

Наряду с особенностями структуры геосреды (т.е. внутренними факторами) для успешных прогнозов землетрясений также важен учет внешних воздействий, которые могут служить триггерами для возникновения динамической подвижки в очаге [Соболев, 2011; Sobolev, 2011]. Это обусловлено самим фактом, что непосредственно перед землетрясением массив горной породы находится в состоянии, близком к неустойчивому равновесию, или, другими словами, в околокритическом состоянии. При таких состояниях могут происходить значительные деформации даже при небольших вариациях напряжения, возбуждаемых, в частности, внешними воздействиями [Соболев, Пономарев, 2003; Макаров и др., 2007; Гохберг, Колосницын, 2010]. При этом создаются условия для более интенсивных сейсмо-электромагнитных взаимосвязей [Molchanov, Hayakawa, 2007] и, возможно, геофизических, в частности электромагнитных аномалий.

Реальность триггерных эффектов и их важная роль в сейсмическом процессе была подтверждена в экспериментах по физическому моделированию воздействий на очаг землетрясений [Садовский и др., 1981; Соболев и др., 1995; Соболев, Пономарев, 2003; Куксенко и др., 2003; Авагимов и др., 2011; Бучаченко,

2014; Мубассарова и др., 2014; Bogomolov et al., 2004]. В отсутствие внешних (триггерных) воздействий нахождение среды в состоянии метастабильного равновесия может быть весьма длительным. Переход к разрушению сплошности среды или подвижке по разлому происходит после внешнего воздействия, задержка укладывается в интервал, характерный для краткосрочных или среднесрочных прогнозов. Таким образом, контроль «триггеров» может улучшить предсказуемость землетрясений. Не исключено, что некоторые из прогнозов, приведенных выше в таблице, оказались успешными как раз в условиях триггерных воздействий на очаг готовящегося землетрясения.

В работе [Пантелеев, Наймарк, 2014] представлен обзор моделей подготовки тектонического землетрясения, базирующихся на подходах из различных отраслей знаний: механики деформируемого твердого тела, статистической физики, математической статистики, нелинейной физики. Особое внимание уделяется идеологии построения моделей в приложении задачи прогноза землетрясений. Обсуждаются достоинства и недостатки существующих моделей и современные тенденции их развития. На основе сделанного обзора авторы пришли к выводу, что пессимизм относительно возможности прогноза крупного тектонического землетрясения, имевший место в научной среде на рубеже XX и XXI вв., сменяется оптимистичным взглядом в будущее благодаря новым достижениям в геомеханике, тектонофизике, геофизике, механике горных пород и других областях науки. Новую уникальную информацию для понимания процессов подготовки крупных землетрясений и разработки формализованных моделей, использующих подходы механики деформируемого твердого тела, по мнению авторов, дает разработка и развитие методов реконструкции тектонических напряжений сейсмоактивных участков земной коры [Ребецкий, 2003, 2007a]; определение строения, степени активности разломных зон земной коры [Семинский, 2009], а также их механизмов активизации, включая изменения глубинного флюидного режима [Шерман и др., 1999; Родкин, Рундквист, 2017]. Также высокочислительные лабораторные и натурные исследования строения и механизмов деформирования межблоковых контактов, разломов с учетом свойств

их заполнителя [Кочарян, 2010; Кочарян и др., 2011]; разработка и развитие методов комплексных геофизических непрерывных скважинных измерений, позволяющих отслеживать изменения характера напряженно-деформированного состояния геосреды в зоне наблюдений [Гаврилов, 2007; Гаврилов и др., 2014; Gavrilov et al., 2013].

В работе Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий, 2008] рассматривается состояние теорий прогноза землетрясений, результаты оценки природных напряжений и новая модель очага. В частности отмечено, что многие представления о процессе подготовки землетрясения перекочевали из механики прочности конструкционных материалов и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон. Согласно [Ребецкий, 2008], назрела необходимость говорить о разломах как об особых геологических телах, развитие которых предопределяется набором механохимических процессов, происходящих в них. Эти процессы формируют спектр специфических условий их деформирования и определяют аномальные характеристики различных физических полей. В работах других авторов, посвященных разломным зонам (см. библиографию в книге [Кочарян, 2016]), были сделаны аналогичные выводы.

Далее Ребецкий предлагает развивать методы мониторинга природного напряженного состояния, позволяющие получать данные о полном тензоре напряжений в земной коре и его изменениях (в частности данные о снятии напряжения в очагах землетрясений). В последнее время были разработаны методы реконструкции поля напряжений [Ребецкий, 2003, 2007б; Angelier, 1989; Гинтов, 2005]. Для дальнейшего развития этих методов нужно научиться оценивать прочностные параметры массивов горных пород в их естественном залегании. Напряжения прямо связаны с процессом разрушения и позволяют наиболее полно характеризовать стадию деформационного процесса.

В рамках представленного анализа процесс формирования аномально протяженного хрупкого разрыва (землетрясения) выглядит как случайный процесс, зависящий от сочетания в разломах участков с активной милонитизацией, дилатансией и метаморфизмом. На-

пряжения, действующие в разломных зонах, зависят от структурно-вещественного состояния слагающих их горных пород, температурного поля, флюидного режима этих зон и определяются региональной тектоникой земной коры. Геологическая среда является существенно неоднородной (в отличие от конструкционных материалов), что «автоматически» предопределяет неоднородность поля напряжений на разных масштабных уровнях осреднения. Как следствие, значения компонентов тензора природных напряжений существенно зависят от масштаба осреднения.

В условиях мозаичности поля напряжений весьма важными для оценки состояния разломов могут быть данные о снятии напряжений в очагах землетрясений, умеренных по силе [Сычева, Богомолов, 2016, 2020]. Снижение уровня снятия напряжений в очагах землетрясений таких же магнитуд, как в предшествующий период, может рассматриваться как еще один среднесрочный предвестник. Его физический смысл заключается в том, что необходимым геомеханическим условием сильного землетрясения является недостаточная (по сравнению с обычным асейсмичным периодом) эффективность высвобождения энергии и сброса напряжений при мало- и среднемагнитудных землетрясениях. Для проверки гипотезы нужен большой объем данных об очаговых параметрах (в частности, снятии напряжений), получение которых стало возможным лишь в последние годы [Сычева и др., 2020].

Несомненно, новые модели очага землетрясения и теоретические подходы к прогнозам (объяснению предвестников) станут основой новых прогнозных методик и алгоритмов. Но пока эта весьма нетривиальная задача находится на стадии разработки, сохраняют свое практическое значение более «старые», но уже работающие методы прогноза землетрясений, которые обсуждались в предыдущем разделе.

В предвидении дальнейших обсуждений перспектив исследований по прогнозам землетрясений (включая краткосрочные) хочется процитировать слова из статьи «Cannot earthquakes be predicted?»: «At the time of Columbus, most experts asserted that one could not reach India by sailing from Europe to the west and that funds should not be wasted on such a folly»* [Wyss et al., 1997]. И добавить, что запад-

ный путь в Индию оказался длинным и затратным, но экспедиция Колумба все же оправдала расходы. Бесперспективно отказываться от научного и социального вызова, каким является проблема прогноза землетрясений, даже если кому-то эта цель кажется недостижимой.

Заключение

После многолетней дискуссии о возможности (невозможности) прогноза землетрясений на 35-й Генеральной ассамблее Международной ассоциации по сейсмологии и физике недр Земли (МАСФНЗ), проходившей в Кейптауне в январе 2009 г., была принята специальная резолюция об исследованиях и предсказуемости землетрясений. В этой резолюции МАСФНЗ, осознавая возможности, которые предоставляют недавние события для изучения землетрясений, рекомендует научному сообществу поддерживать исследования по прогнозу и предсказуемости землетрясений, их аттестации и сравнительному испытанию методов прогноза.

Изложенные в обзоре материалы показывают, что, хотя проблема прогноза землетрясений все еще далека от решения, есть заметное продвижение в исследованиях по этой проблеме. Это подтверждается тем, что случаи удачных среднесрочных прогнозов времени и места землетрясения (сделанных не ретроспективно, а в реальном времени) уже не единичны. Разработка методов и подходов к краткосрочному прогнозу землетрясений остается злободневной задачей, которая может иметь (или нет?) эффективное решение. Однако есть основания полагать, что совершенствование методов среднесрочных прогнозов приблизят их к краткосрочным благодаря сокращению времени упреждения события до сопредельного диапазона (около месяца). Эта тенденция прослеживается в среднесрочных прогнозах, сделанных в последнее десятилетие.

Для дальнейших исследований важно, что фактически было обнаружено наличие отдельных сейсмоопасных зон, «допускающих» такие прогнозы. Одной из этих зон является южная часть о. Сахалин, для которой был отмечен прецедент «предсказуемости» землетрясений с магнитудами $M < 7$. Во всех этих зонах и в прилегающих к ним регионах перспективно

проведение новых исследований геологического строения среды, ее геомеханических свойств, а также закономерностей сейсмического процесса для развития и совершенствования подходов к прогнозу землетрясений.

Список литературы

1. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Окунев В.И. 2011. Динамика энергообменных процессов в модельных образцах при воздействии упругим и электромагнитным полями. *Физика Земли*, 10: 64–70. EDN: OJGOND
2. Анциферов М.С. 1969. О возможностях геоакустического прогноза местных землетрясений. В кн.: *Труды всероссийского симпозиума по сейсмическому режиму (3–7 июня 1968 г.)*. Новосибирск, ч. 2, с. 28–141.
3. Арутюнян А.Р. 2010. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений. *Инженерно-строительный журнал*, 3: 56–60.
4. Барсуков О.М. 1970. О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 1: 84–89.
5. Болдина С.В., Копылова Г.Н. 2017. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 863–880. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
6. Бончковский В.Ф. 1954. Изменения градиента электрического потенциала в атмосфере как один из возможных предвестников землетрясений. *Труды Геофизического института*, 25(152): 192–206.
7. Бучаченко А.Л. 2014. Магнитоэластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу. *Успехи физических наук*, 189(1): 101–108.
8. Бучаченко А.Л., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Сорокин В.М., Страхов В.Н., Чмырев В.М. 1996. Ионосферные предвестники землетрясений. *Успехи физических наук*, 166(9): 1023–1029.
9. Войтов Г.И., Добровольский И.П. 1994. Химические и изотропно-углеводные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах. *Физика Земли*, 3: 20–31.
10. Воробьев А.А., Самохвалов М.А., Горелкин А.Ф. и др. 1976. Аномальные изменения интенсивности естественного электромагнитного поля в районе Ташкента перед землетрясением. *Узбекский геологический журнал*, 2: 9–11.
11. Гаврилов В.А. 2007. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии. *Доклады АН*, 414(3): 389–392. EDN: IAQDXJ
12. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. 2014. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов. *Физика Земли*, 1: 89–103. EDN: RLWIFL
13. Гамбурцев Г.А. 1955. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. *Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР*, 1: 7–14.
14. Гинтов О.Б. 2005. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 572 с.

* Во времена Колумба большинство экспертов утверждали, что невозможно добраться до Индии, плывя из Европы на запад, и что средства не следует тратить впустую на такую глупость. (Перевод авторов).

15. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
16. Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. **2010**. Триггерные механизмы землетрясений. В кн.: *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания, г. Москва, 22–24 июня 2010 г.* М.: ГЕОС, с. 52–61.
17. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Е.Л. **1979**. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности. *Доклады АН СССР*, 248(5): 1077–1081.
18. Гуфельд И.Л., Афанасьев А.В., Афанасьева В.В., Новоселов О.Л. **2010**. Триггерные эффекты сеймотектонического процесса в динамически меняющейся геологической среде. *Доклады АН*, 433(1): 92–96.
19. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Л. **2011**. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных землетрясений. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2(4): 378–415. <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0051>
20. Добровольский И.П. **1991**. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. М.: ИФЗ РАН, 218 с.
21. Друмя А.В. **1985**. *Землетрясение: где, когда, почему?* Отв. ред. М.А. Садовский. Кишинев: Штиинца, 196 с.
22. Завьялов А.Д. **1986**. Параметр концентрации сейсмогенных разрывов как предвестник сильных землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 3: 58–71.
23. Завьялов А.Д. **2006**. *Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация*. М.: Наука, 242 с.
24. Закупин А.С. **2016**. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. *Геоинформатика*, 1: 34–43.
25. Закупин А.С., Семенова Е.П. **2018**. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5(25): 83–98. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
26. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018**. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Оморского землетрясения на Сахалине ($M_w=5.8$, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911.
27. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. **2020**. Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, 19(1): 66–78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
28. Захарова А.И., Рогожин Е.А. **2000**. Сильные землетрясения северо-западной окраины Тихого океана и их глубоководные предвестники. *Вестник ОИГГ РАН*, 2-1(12): 82–94
29. Захарова А.И., Рогожин Е.А. **2001**. Глубоководные предвестники сильных землетрясений. *Доклады АН*, 381(6): 825–826. EDN: KHESLY
30. Захарова А.И., Рогожин Е.А. **2004**. Пространственно-временные соотношения очагов сильных землетрясений и их глубоководных предвестников. В кн.: *Исследования в области геофизики (к 75-летию ОИГГ им. О.Ю. Шмидта)*. М.: ОИГГ РАН, с. 13–19.
31. Зубков С.И. **2002**. *Предвестники землетрясений*. М.: ИФЗ РАН, 140 с.
32. Кейлис-Борок В.И., Малиновская Л.Н. **1966**. Об одной закономерности в возникновении сильных землетрясений. В кн.: *Сейсмологические методы исследований*. М.: Наука, с. 88–97.
33. Киссин И.Г. **2013**. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений. *Физика Земли*, 4: 145–160. DOI: 10.7868/S0002333713040054
34. Короновский Н.В., Наймарк А.А. **2012**. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 6: 3–12. EDN: PRGNYT
35. Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. **2019**. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 3: 3–12. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
36. Кособоков В.Г. **2005**. *Прогноз землетрясений и геодинамические процессы*. Ч. 1. *Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы*. М.: ГЕОС, 172 с. (Вычислительная сейсмология; вып. 36).
37. Кособоков В.Г., Ротвайн И.М. **1977**. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VI. Магнитуда $M > 7.0$. В кн.: *Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии*. М.: Наука, с. 3–18.
38. Кочарян Г.Г. **2010**. Разломная зона как нелинейная механическая система. *Физическая мезомеханика*, 13 (Спец. вып.): 5–17. EDN: NQXHWN
39. Кочарян Г.Г. **2016**. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 424 с.
40. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. **2011**. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования малопрочных тонких слоев геоматериалов. *Физическая мезомеханика*, 14(6): 63–70.
41. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др. **2003**. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах). *Физика твердого тела*, 45(12): 2182–2186. EDN: RCZSWP
42. Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А., Солдчук А.А., Щербина А.О. **2017**. Исследования акустической эмиссии приповерхностных осадочных пород на Камчатке. *Геосистемы переходных зон*, 1(3): 57–63. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.057-063
43. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Ким Ч.У., Коровин М.Е., Малашенко А.Е., Савочкин П.В., Тихонов И.Н. **2007a**. Землетрясение 17(18) августа 2006 г. на Сахалине и первая реализация комплексного прогноза. *Доклады АН*, 412(3): 396–400. EDN: IAAJZH
44. Левин Б.В., Ким Чун Ун, Тихонов И.Н. **2007b**. Горно-заводское землетрясение 17(18) августа 2006 г. на о-ве Сахалин. *Тихоокеанская геология*, 26(2): 102–108.
45. Любушин А.А. **2011**. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотному микросейсмическому шуму. *Геофизические процессы и биосфера*, 10(1): 9–35. EDN: NDZZMV
46. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. **2007**. *Нелинейная механика геоматериалов и геосред*. Новосибирск: ГЕО, 235 с.
47. Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. **1997**. Парадигма самоорганизованной критичности. Иерархия моделей и пределы предсказуемости. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 5(5): 89–106.
48. Мамадалиев Ю.А. **1964**. Об исследовании параметров сейсмического режима во времени и пространстве.

- В кн.: *Вопросы региональной сейсмичности Средней Азии*. Фрунзе: Илим, с. 93–104.
49. Мещеряков Ю.А. 1968. Изучение современных движений земной коры и проблема прогноза землетрясений. В кн.: *Современные движения земной коры*. М.: ВИНТИ, 3, с. 44–62.
 50. Милькис М.Р. 1986. Метеорологические предвестники сильных землетрясений. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 3: 36–47.
 51. Могилевский К. 1988. *Предсказание землетрясений*. Пер. с англ. Б.А. Борисова. М.: Мир, 382 с.
 52. Моргунов В.А. 1999. Реальности прогноза землетрясений. *Физика Земли*, 1: 79–91.
 53. Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. 2014. Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических импульсов. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(4): 919–938. EDN: TDMROT
 54. Николаев В.А. 1994. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами. В кн.: *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, с. 103–114.
 55. *Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации*: Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. Гл. ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов. 73 с. http://seismos-u.ifz.ru/documents/zapiska_OCR_2016.pdf
 56. Осика Д.Г. 1981. *Флюидный режим сейсмически активных областей*. М.: Наука, 201 с.
 57. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. 2014. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*, 3: 44–62. EDN: TDURFP
 58. Паровышный В.А., Сеначин В.Н., Веселов О.В., Кочергин Е.В. 2015. Временные изменения естественных геофизических полей в связи с проблемой прогноза сейсмических событий. *Геодинамика и тектонофизика*, 6(1): 63–76. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0172>
 59. Певнев А.К. 2015. Прогноз землетрясений возможен (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 1. Г.А. Гамбургцев и возможность прогнозирования землетрясений. *Пространство и Время*, 4(22): 195–201.
 60. Певнев А.К. 2016. Прогноз землетрясений возможен (О месте геодезических исследований в решении проблемы прогноза землетрясений). Ч. 2. Возвращение к Г.А. Гамбургцеву: деформационная модель подготовки очага корового землетрясения. *Пространство и Время*, 1–2(23–24): 227–238. URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271provstl_2-23_24.2016.91
 61. *Природные опасности России. Сейсмические опасности*. 2000. Отв. ред. Г.А. Соболев. М.: Крук, 296 с.
 62. Ребецкий Ю.Л. 2003. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений. *Доклады РАН*, 388(2): 237–241.
 63. Ребецкий Ю.Л. 2007а. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода. *Геофизический журнал*, 29(4): 92–110.
 64. Ребецкий Ю.Л. 2007б. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.
 65. Ребецкий Ю.Л. 2008. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, с. 359–395.
 66. Ребецкий Ю.Л. 2021. К теории детерминированного прогноза землетрясений методом LURR. *Геосистемы переходных зон*, 5(3): 192–222. (На рус. и англ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.192-208.208-222>
 67. Рикитак Т. 1979. *Предсказание землетрясений*. М.: Мир, 388 с.
 68. Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д. и др. 2011. *Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реально-го сейсмического прогноза*. М.: Светоч Плюс, 368 с. EDN: THIGTP
 69. Родкин М.В., Рундквист Д.В. 2017. *Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза*. Долгопрудный: Изд. дом Интеллект, 288 с.
 70. Ружич В.В. 1996. О среднесрочном прогнозе землетрясений в Прибайкалье. В кн.: *Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века*. Новосибирск: Наука, с. 143–147.
 71. Садовский М.А. 1986. Автоподобность геодинамических процессов. *Вестник АН СССР*, 8: 3–11.
 72. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. 1991. *Сейсмический процесс в блоковой среде*. М.: Наука, 96 с.
 73. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. 1981. Влияние механических вибраций на характер пластических деформаций материалов. *Физика Земли*, 6: 32–42.
 74. Салтыков В.А. 2016. Приливные эффекты в высокочастотных сейсмических шумах в сейсмическом регионе: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 48 с.
 75. Семинский К.Ж. 2009. Тектонофизический анализ внутренней структуры разломных зон. В кн.: *Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы первой молодежной школы-семинара*. М.: ИФЗ РАН, 1, с. 258–276.
 76. Сидорин А.Я. 1992. *Предвестники землетрясений*. М.: Наука, 192 с.
 77. Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. 2017. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(1): 181–202. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
 78. Сим Л.А., Каменев П.А., Богомолов Л.М. 2020. Новые данные о новейшем напряженном состоянии земной коры острова Сахалин (по структурно-геоморфологическим индикаторам тектонических напряжений). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 372–383. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
 79. Симбирева И.Г., Лукк А.А., Нерсесов И.Л. 1974. Изменение динамических параметров очагов слабых землетрясений Гармского района в связи с возникновением сильных землетрясений. В кн.: *Региональные исследования сейсмического режима*. Кишинев: Штиинца, с. 138–153.
 80. Смирнова М.Н. 1971. О влиянии слабых землетрясений на режим Пятигорских минеральных источников. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 7: 80–83.
 81. Соболев Г.А. 1993. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 313 с. EDN: TGSIGN

82. Соболев Г.А. **1999.** Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 4/5: 63–72. EDN: RZYUFX
83. Соболев Г.А. **2003.** Перспективы прогноза землетрясений. В кн.: *Проблемы геофизики XXI века*. М.: Наука, с. 158–178.
84. Соболев Г.А. **2011.** Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 56 с.
85. Соболев Г.А., Морозов В.Н. **1970.** Локальные возмущения электрического поля на Камчатке и их связь с землетрясениями. В кн.: *Физические основания поисков методов прогноза землетрясений*. М.: Наука, с. 110–121.
86. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003.** Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 270 с.
87. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. **1996.** Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильным землетрясением. *Вулканология и сейсмология*, 4: 64–74. EDN: SGJVPZ
88. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. **1998.** Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 6: 17–26. EDN: RZZZQV
89. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. **1995.** Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника. *Физика Земли*, 12: 72–78. EDN: QFFFDE
90. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2016.** Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*, 57(11): 2071–2083.
91. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. **2020.** О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 393–446. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
92. Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. **2020.** Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 358 с.
93. Такаги А., Исибаси К., Суйсиро С., Усами Т., Матсуда Т., Асада Т., Йосии Т., Вакида Х., Сато Х., Мидзутани Х. **1984.** Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 287 с.
94. Татаурова А.А. **2015.** Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3: 93–101.
95. Тихонов И.Н. **2001.** О долговременной цикличности сильнейших ($M > 7.5$) землетрясений в районе Южных Курильских островов. В кн.: *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана*. Южно-Сахалинск, 1, с. 23–33.
96. Тихонов И.Н. **2002.** Закон повторяемости отрезков времени между последовательными землетрясениями. *Доклады АН*, 387(2): 250–252. EDN: PSYRMC
97. Тихонов И.Н. **2006.** Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий. Владивосток; Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 214 с.
98. Тихонов И.Н. **2009.** Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе о. Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. *Тихоокеанская геология*, 28(5): 22–29.
99. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Левин Ю.Н., Прытков А.С., Фролов Д.И. **2008.** Симуширские землетрясения 2006–2007 гг. – новая страница в истории курильской сейсмоактивной зоны. В кн.: *Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России*: Труды регионал. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский, 1, с. 215–219.
100. 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. EDN: XWRJZN
101. Уломов В.И. **1971.** Внимание! Землетрясение! Ташкент: Узбекистан, 160 с.
102. Уломов В.И., Мавашев Б.З. **1971.** Предвестники Ташкентского землетрясения. В кн.: *Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года*. Ташкент: ФАН Узб. ССР, с. 188–192.
103. Федотов С.А. **2005.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской зоны. М.: Наука, 303 с.
104. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. **2017.** Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с $M = 7.2$ (Камчатка). *Доклады АН*, 472(4): 462–465. <https://doi.org/10.7868/S0869565217040144>
105. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. **1999.** Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии. *Тихоокеанская геология*, 18(2): 41–53.
106. Щекотов А.Ю., Чебров В.Н., Берсенева Н.Ю. **2015.** Электромагнитные предвестники Олюторского и Охотоморского землетрясений. В кн.: *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*: труды Пятой науч.-техн. конф.: к 100-летию организации инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 года. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, с. 311–315. EDN VPYCN
107. Юнга С.Л. **1996.** Ретроспективный анализ временных вариаций тензоров сейсмических моментов в очаговой зоне Шикотанского землетрясения. *Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень*, 2(2): 24–40.
108. Юнга С.Л. **1999.** Сравнительный анализ сеймотектонических деформаций в областях активных геодинамических режимов. В кн.: *Геофизика на рубеже веков*: Избр. труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, с. 253–264.
109. Angelier J. **1989.** From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data. *J. of Structural Geology*, 11(1-2): 37–49. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5)
110. Bak P., Tang C. **1989.** Earthquake as a self-organized critical phenomenon. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/jb094ib11p15635>
111. Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L. et al. **2005.** Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, 437(7061): 969–974. <https://doi.org/10.1038/nature04067>
112. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. **2004.** Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
113. Bormann P. **2011.** From earthquake prediction research to time-variable seismic hazard assessment applications. *Pure Applied Geophysics*, 168(1-2): 329–366. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0114-0>

114. Coble R.W. **1965**. The effects of the Alaskan earthquake of March 27, 1964, on ground water in Iowa. *Proceedings of the Iowa Academy of Science*, 72: 323–332.
115. Evison F.F., Rhoades D.A. **1993**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 36(1): 51–60. <https://doi.org/10.1080/00288306.1993.9514553>
116. Evison F.F., Rhoades D.A. **1997**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. II. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 40(4): 537–547. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514782>
117. Fujii Y. **1966**. Gravity change in the shock area of Niigata earthquake? 16 June 1964. *Zisin (J. of the Seismological Society of Japan. Ser. 2)*, 19(3): 202–216. https://doi.org/10.4294/zisin1948.19.3_200
118. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. **2013**. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks. *Russian J. of Earth Science*, 13(1): 1–16. <https://doi.org/10.2205/2013es000527>
119. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020**. Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
120. Geller R.J. **1991**. Shake up for earthquake prediction. *Nature*, 352: 275–276. <https://doi.org/10.1038/352275a0>
121. Geller R.J. **1996**. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction. *Geophysical Research Letters*, 23(11): 1291–1293. <https://doi.org/10.1029/96gl00742>
122. Geller R. **1997**. Earthquake prediction: critical review. *Geophysical J. International*, 131(3): 425–450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x>
123. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
124. Hayakawa M., Molchanov O.A. (eds.) **2002**. *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 477 p.
125. Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. **1996**. Precursory signature of the Kobe earthquake on VLF sub-ionospheric signal. *J. of Atmospheric Electricity*, 16(3): 247–257.
126. Jones L.M., Han W., Hauksson E., Jin A., Zhang Y., Luo Z. **1984**. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *Geophysical Research Letters*, 89(B9): 7697–7707. <https://doi.org/10.1029/jb089ib09p07697>
127. Kato Y., Utashiro Sh. **1949**. On the changes of the terrestrial magnetic field accompanying the great Nankaido earthquake of 1946. *Science Reports of Tohoku University, Japan. Ser. 5*, 1: 40.
128. Kissin I.G. **1997**. Middle and short-term precursors of earthquakes and their factors determining reliability. *J. Earthquake Prediction Research*, 6(3): 367–386.
129. Knopoff L. **1996**. Earthquake prediction: The scientific challenge. *Proceedings of The National Academy of Science*, 93(9): 3719–3720. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.9.3719>
130. Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. **1990**. Localization of intermediate-term earthquake prediction. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(12): 19763–19772. <https://doi.org/10.1029/jb095ib12p19763>
131. Lockner D.A., Beeler N.M. **1999**. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B9): 20133–20151. <https://doi.org/10.1029/1999jb900205>
132. Mervis J. **1990**. Earthquake scientists hope that recent rumblings will lead to more funding. *The Scientist*, April 2. <https://www.the-scientist.com/news/earthquake-scientists-hope-that-recent-rumblings-will-lead-to-more-funding-61400>
133. Molchanov O., Hayakawa M. **2007**. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 432 p.
134. Raleigh C.B., Bennett G., Craig H., Hanks T., Molnar P., Nur A., Savage J., Scholz C., Turner R., Wu F. **1977**. Prediction of the Haicheng earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72: 236–272. <https://doi.org/10.1029/eo058i005p00236>
135. Reid H.F. (ed.) **1910**. *The California earthquake of April 18 1906. Vol. 2. The mechanisms of the earthquake*. Washington: Carnegie Inst. Wash.
136. Rikitake T. **1966**. A five year plan for earthquake prediction research in Japan. *Tectonophysics*, 3: 1–15. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(66\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(66)90021-7)
137. Roeloffs E., Langbein J. **1994**. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Reviews of Geophysics*, 32(3): 315–335. <https://doi.org/10.1029/94rg01114>
138. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M. **2009**. Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M = 6.3) on 6 April 2009. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 9: 1727–1732.
139. Scholz C. **1997**. What ever happened to earthquake prediction? Reprint. with permission from *Geotimes*, vol 17, March 1997. Copyright the American Geological Institute, 1997. URL: <https://earthquake.usgs.gov/learn/parkfield/scholz.html> (accessed 04.09.2022).
140. Scholz C. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p.
141. Shebalin P. **2006**. Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains. *Tectonophysics*, 424(3–4): 335–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.040>
142. Shebalin P., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N. **2004**. Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M=8.1. A case history. *Earth, Planets and Space*, 56: 715–724. <https://doi.org/10.1186/bf03353080>
143. Snieder R., van Eck T. **1997**. Earthquake prediction: a political problem? *Geologische Rundschau*, 86: 446–463. <https://doi.org/10.1007/s005310050153>
144. Sobolev G.A. **2011**. Seismicity dynamics and earthquake predictability. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
145. Sobolev G.A., Chelidze T.L., Zavvalov A.D., Slavina L.B., Nikoladze V.E. **1991**. Maps of expected earthquakes based on a combination of parameters. *Tectonophysics*, 193(4): 255–265. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90335-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90335-P)
146. Tikhonov I.N., Kim Ch. U. **2008**. A successful prediction of the Nevel'sk August 2, 2007, earthquake (MLH=6.2) in southern Sakhalin Island. *Doklady Earth Sciences*, 420(1): 704–708. <https://doi.org/10.1134/s1028334x08040417>

147. Tikhonov I.N., Kim Ch. U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1-4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>
148. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012**. The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
149. Torunbalci N. **2004**. Seismic isolation and energy dissipating systems in earthquake resistant design. In: *13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6*. Paper No. 3273. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3273.pdf
150. Wang K., Chen Q-F., Sun S., Wang A. **2006**. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bull. of the Seismological Society of America*, 96(3): 757–795. <https://doi.org/10.1785/0120050191>
151. Wyss M. et al. **1997**. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278(5337): 487–490. https://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cannot%20earthquakes%20be%20predicted%3F&journal=Science&volume=278&publication_year=1997&author=Aceves%2CRL&author=Park%2CSK (accessed 05.09.2022)
152. Yin X., Yin C. **1991**. The precursor of instability for non-linear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.
153. Yin X.C. et al. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145(3/4): 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>
154. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001**. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29

REVIEW

TRANSLATION

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.164-182>
<https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems

Leonid M. Bogomolov^{*1}, Nailia A. Sycheva²

^{*}E-mail: bleom@mail.ru

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

Abstract. The review presents the most important results of investigations in the field of strong earthquake predictions, which were published in scientific sources. The ways of further studies of seismic prognosis problem are involved into consideration, as well as the based theoretical model, to improve predictive methods and algorithms. One can follow the research transformation from initial (historical) articulation of this intriguing problem to its current state of the art, including modern approaches based on the data of seismological and geophysical monitoring, and as well as ionospheric and atmospheric surveys. Examples of successful earthquake predictions have been discussed and treated from viewpoint of the potential of used methods, at least for some regions (for example, Sakhalin and Kamchatka). It is assumed that the predictions, which were realized due to certain algorithms and/or working precursors rather than random guessing, are able to weaken the pessimist side in the discussion: are earthquakes predictable or unpredictable in principle.

Keywords: earthquake, predictive methods, mid-term prediction, short-term prediction, geophysical, seismological precursors, source-site model, fault

For citation: Bogomolov L.M., Sycheva N.A. Earthquake predictions in XXI century: prehistory and concepts, precursors and problems. *Geosistemy perekhodnykh zon* = Geosystems of Transition Zones, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 145–182. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182>; <https://www.elibrary.ru/nhwrtf>

Introduction

Earthquake prediction has long been understood as predicting the area (location), time and magnitude (energy) of the expected seismic event [Zubkov, 2002]. At present, the prediction of the

earthquake location and strength for a long time (long-term prognosis) is generally associated with seismic zoning of various levels of detail: general seismic zoning (GSZ), detailed and microseismic ones. General seismic zoning is of practical im-

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы. Translation by G.S. Kachesova.

portance for designing buildings and constructions in seismically dangerous regions. Indeed, the GSZ maps can be interpreted as a probabilistic prediction for decades, i.e. the longest period considered by seismologists. The maximum intensity of seismic shocks (in points) is estimated [*General seismic...*, 2016]. The GSZ is implemented on the basis of a set of criteria and characteristics: density of earthquakes hypocenters, energy and intensity of events, geological and geophysical characteristics of recurrence graphs, maximum magnitudes ($M_{\max}$), shaking, seismic activity and other macroseismic data [Drumya, 1985; Shebalin, 2006; Shebalin et al., 2004; etc.].

Development of methods for seismic zoning and problems of its practical implementation have created prerequisites for developing the efficient and economically feasible means of earthquake-resistant construction, i.e. various methods and devices of vibration control, to reduce seismic loads on buildings and constructions [Arutyunyan, 2010; Torunbalci, 2004]. The principles of passive control (seismic isolation of buildings from soil) are widely used in earthquake-resistant construction. Active monitoring apparatus, including real-time soil oscillation recording equipment, power drives to generate antiphased vibration of constructive units, and a control system, have also been developed for the important objects.

After publication of the GSZ-2012 map models, which were supposed to replace the GSZ-97 maps, they were widely discussed by the scientific community in Russia. These models were approved by the management of the Russian Academy of Sciences and Russian Gosstroy and adopted as norms for earthquake-resistant construction. Thereafter the maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation (including the territory of Crimea after 2014) were created as a result of the work on the improvement and updating of the above models. They were named the GSZ-2016 maps (see map in the figure). Responsible editors of the GSZ-2016 maps – Professor V.I. Ulomov (Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS) and M.I. Bogdanov (general director of the LLC “Institute of geotechnics and engineering research in construction”)

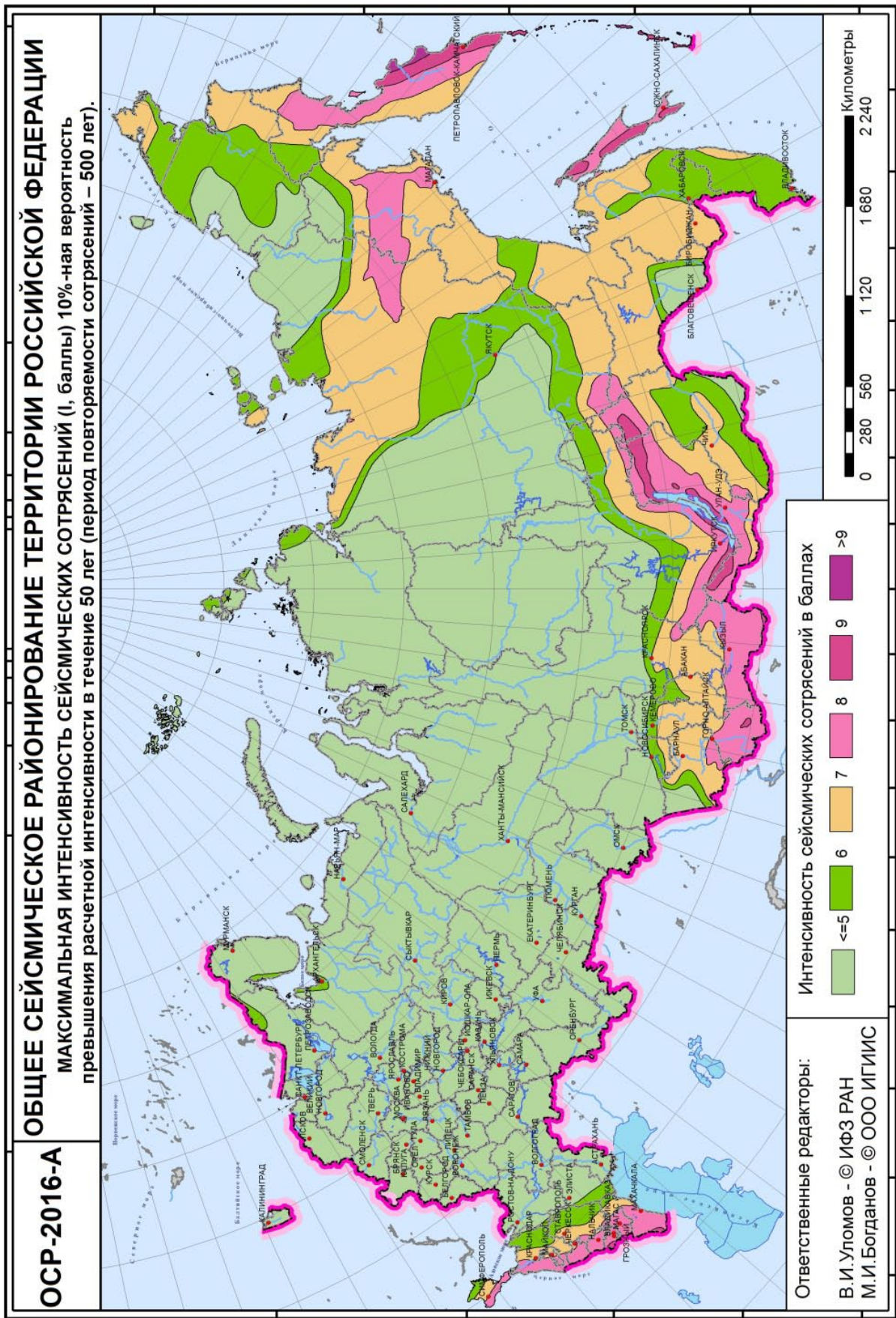
Various models of the seismic regime, including the probabilistic model successfully applied in the GSZ-97, were used when mapping

GSZ-2016 maps. The recommendations of the broadened meeting of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on seismology, held on 24.10.2013, were taken into account in the final version of the GSZ-2016 maps.

Detailed seismic and microseismic zoning takes into account local engineering and geological conditions (soil properties, groundwater level, etc.) and determine the amendments to the maximum intensity of seismic shocks on the GSZ maps. In this case, the value of the correction in the points does not exceed 0.5 as a rule.

The prediction of the time of a seismic event distinguished itself as a separate problem related both to the study of earthquake precursors (phenomenological approaches) and to the development of adequate models of a seismic source.

This problem remains one of the main challenges for the Earth sciences, and its fundamentality remarkably manifested in the discussion on the principal predictability or unpredictability of earthquakes initiated in the 1990s by R. Geller [Geller, 1991, 1996, 1997; Geller et al., 1997]. During the discussion it has been noted that the prediction problem involves both scientific and socio-economic components [Snieder, Van Eck, 1997]. Social and economic aspects may change over time, that affects the assessment of predictions and their practical relevance. However, this is beyond the scope of this review. From the scientific point of view, it can be noted that criticism of earthquake precursors detection is based mainly on the experience of observing the anomalies of geophysical fields in Japan and Greece, in particular, based on the geodetic data and electrotelluric potentials (VAN method) [Geller, 1996]. But, the conclusion that there are no reliable precursors cannot be automatically transposed to all situations, including studies in other regions and the application of new methods. Doubts about the earthquake possibility have been aggravated due to the well-known provisions of nonlinear dynamics (divergence of phase trajectories, instability when the initial conditions change [Koronovskii, Naimark, 2012; Koronovskiy et al., 2019]) and the concept of self-organized criticality (sometimes called third generation of synergy [Malinetskiy, Podlazov, 1997; Bak, Tang, 1989]). Appli-ance of this concept to the analysis of natural disasters has highlighted such unpredictable scenarios, as, for instance, the sand pile model (“heaps of sand”) [Bak, Tang, 1989].



GSZ-2016-A map of the general seismic zoning of the Russian Federation territory: maximum intensity of seismic shocks (in points) with a tolerance of 10% probability of exceedance of an estimated intensity within 50 years (occurrence frequency of earthquakes – 500 years) [General seismic..., 2016].

However, the hypothesis that the flow of seismic events corresponds to the models of self-organized criticality has not been proven. But there are known examples of explicit inconsistency of real seismicity with such models (precedents of successful earthquake predictions [Shebalin *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]).

Background: on earthquake predictions and precursors

The history of scientific research of the problem of earthquake precursors and prediction the events occurrence time covers more than half a century. This period is characterized, on the one hand, with an avalanche-like accumulation of data on the earthquake precursors, especially in the initial period (1960s–1970s) and, on the other hand, by a very limited possibility of their use in real prognosis.

An active searching and research of the earthquake precursors had begun with strong earthquakes in the beginning of the 20th century, which caused the death of people and entire cities. The earthquake in China (16.12.1920, $M = 7.8$), which left more than 200 thousand dead, is among the most terrible of them, in Japan (01.09.1923, $M = 8.3$), during which more than 100 thousand people have died. The catastrophic Ashgabat earthquake (06.10.1948, $M = 7.3$) in the territory of Turkmenistan completely destroyed the city and took the life of more than 100 thousand people.

The work on the organization of prognosis research began in many countries of the world, such as in Japan, the United States, the People's Republic of China, the former Soviet Union, after these devastating earthquakes. In the former USSR, the Ashgabat earthquake made the problem of predictions of such terrible natural phenomena one of the most urgent in the country. A research program on earthquake prediction was started under supervision of the Academician G.A. Gamburtsev. He was successful in creating such a comprehensive, well-thought-out and scientifically justified program that had not lost its importance as a guide to the implementation of practically meaningful earthquake prediction up to now [Pevnev, 2015]. Gamburtsev's main ideas about the status and prospects of the work on this problem were formulated in the paper [Gamburtsev, 1957], and subsequent publications (see: [Pevnev, 2015, 2016]).

The Gamburtsev program was based on the idea that the Earth's crust in the process of its evolution was divided into relatively strong blocks, which were separated by weakened zones – seismic joints (faults). The slow relative displacements of these blocks lead to the accumulation of shear stresses and their concentration at the certain points of a joint. Earthquakes occur in the points, where stresses exceed the ultimate strength.

The first worthy publications concerning this problem, according to [Zubkov, 2002], include studies of precursors by the movement of the Earth's crust [Reid (*ed.*), 1910; Meshcheryakov, 1968; Takagi *et al.*, 1984]; volcanic eruptions [Takagi *et al.*, 1984]; sea level [Rikitake, 1979]; groundwater level [Coble, 1965]; atmospheric electricity [Bonchkovskiy, 1954]; geoacoustic activity [Antsiferov, 1969]; seismic regime variations [Mamadaliyev, 1964; Keylis-Borok, Malinovskaya, 1966; Kosobokov, Rotvayn, 1977]; orientation of tension axes in the sources of weak earthquakes before a strong earthquake [Simbireva *et al.*, 1974]; discharge of groundwater sources [Smirnova, 1971]; geomagnetic precursors [Kato, Utashiro, 1949]; pulsed electromagnetic [Vorob'ev *et al.*, 1976; Gokhberg *et al.*, 1979]; meteorological [Rikitake, 1979]; gravitational [Fujii, 1966]; thermal [Ulomov, 1971; Mil'kis, 1986]; radon [Barsukov, 1970; Ulomov, Mavashev, 1971]; electrotelluric [Sobolev, Morozov, 1970].

At the second half of the XX – beginning of the XXI century, the state of the earthquake prediction problem has been discussed in the famous monographs: “Earthquake prediction” [Rikitake, 1979; Mogi, 1988], “Earthquake forecasting methods. Their application in Japan” [Takagi *et al.*, 1984], “Earthquake precursors” [Sidorin, 1992; Zubkov, 2002], “Fundamentals of earthquake forecasting” [Sobolev, 1993], “Middle-term earthquake prediction: fundamentals, method, realization” [Zav'yalov, 2006], “Methods of analysis of earthquake catalogues for the purposes of mid- and short-term predictions of strong seismic events” [Tikhonov, 2006].

Numerous results have been obtained, but no anomalies have been identified as the variations that can be recognized as unambiguous signatures of an expected strong earthquake. Variations of geophysical and other fields, which are hypothetical precursors, were recorded against the background noise accompanying the geode-

formation process [Zubkov, 2002; Kosobokov, 2005]. Under these conditions, there were variations in the same fields and in the aseismic period, conventionally called false alarms, in addition to the variations associated with the preparation of the earthquake source. This circumstance has been regarded as a failure of the prognosis in a number of works [Drumya, 1985; Gufeld *et al.*, 2011].

It gave rise to a skeptical conclusion about chosen incorrect strategy of solving the problem of the place prediction for preparing earthquake, which was formulated in the work [Pevnev, 2015]. This conclusion from refers to the use of “methods of solving the inverse problems (image recognition) by the separate indirect signs – the anomalies in various fields: seismic, deformation, hydrogeological, geochemical, electromagnetic and many others” [Pevnev, 2015, p. 195] for prediction purposes. Alternative methods, i.e. the direct problem of detecting the location and time of an earthquake according to the signs that need to be developed during the formation of a source, require the development of adequate geomechanical models. But this problem seems to be even more difficult than earthquake prediction, and may take a long time to be resolved. Therefore, it is difficult to agree with the above conclusion, and the rapid improvement of the methods for solving the inverse problems allows a progress in the prognosis, and, possibly, one can expect practically important results (although predictions will remain probabilistic).

Catastrophic earthquakes at the end of the last century in China, Italy, Japan, Iran, USA (in California), Turkey and the former USSR in Spitak and Neftegorsk renewed interest in studying the problem of earthquake prediction [Kosobokov, 2005; Zav'yalov, 2006; Tikhonov, 2006].

In the US, the problem of earthquake prediction was raised in the mid-1960s. A number of conferences were held in collaboration with Japan, but no significant results were achieved until the foundation of the National Earthquake Hazards Reduction in 1977 [Scholz, 1997]. One of its tasks was to develop the methods for earthquake prediction and early warning systems.

The Parkfield experiment [Bakun *et al.*, 2005] was started in 1984. It was based on the quasi periodicity of earthquake occurrence at this

site of the San Andreas Fault (California, USA). And even that experiment did not allow to correctly predict the time of the next earthquake [Roeleffs, Langbein, 1994]. In 1990, the focus was shifted from the prognosis to the damage mitigation [Mervis, 1990]. In 1995, the National Academy of Sciences held a colloquium “Earthquake prediction: the scientific challenge”, which could not provide any new information for predictions [Knopoff, 1996].

In Japan, the earthquake prediction program began in 1964 [Bormann, 2011] by a five-year plan [Rikitake, 1966]. In 1978, the program focused on the prediction of an earthquake with $M > 8$. The area near Tokyo, where a devastating earthquake occurred on 01.09.1923, $M = 8.3$ was monitored for a long time. The main research of Japanese seismologists was concentrated at this small site until the earthquake in Kobe (17.01.1995, $M = 7.3$) had occurred. After 1994, Japan had sharply increased its seismological research funding, creating one of the densest networks of seismic and GPS stations (50–100 km distance between the stations). The data of this network were used [Tikhonov, Rodkin, 2012] for the mid-term prediction of the Tokachi-oki earthquake (26.09.2003, $M_w^* = 7.3$), which was justified partially. No predictions were made of this earthquake in Japan. Currently, the main efforts of Japanese seismologists are aimed at identifying the areas with irregularities (“asperities”, literally roughness [Kocharyan, 2016]) on the contacts of the plates. These irregularities, in their opinion, are a potential source of their «anchoring» and, therefore, a factor, which determines the subsequent accumulation of the stress level.

A catastrophic Tangshan earthquake (18.07.1976, $M = 7.3$) had occurred in China after a successful prediction of the earthquake in the vicinity of Haicheng (04.02.1975, $M = 7.3$). Tangshan earthquake did not manifest itself in a number of monitored precursors (foreshocks, etc.). Following Japan and the United States, China develops the networks of seismological and geophysical stations to study the physical fields of seismic zones. A great earthquake in China's Sichuan Province in 2013 stimulated the decision to invest more than \$300 million in earthquake predictions in order to develop a network of 5000 observation stations in the most danger-

* Magnitude designations in the review correspond to their designations in the sources.

ous areas of the country to provide early warning of a strong earthquake (<https://www.epochtimes.ru/kitaj-sozdast-sistemu-ekstrennogoopoveshheniyao-zemletryaseniyyah-99035049/#/>).

In Russia, in the 1990s, after the collapse of the USSR and the actual cessation of funding for scientific research, the complex studies of seismically active regions were significantly reduced (the geophysical polygons at Garm and Talgar have been lost together with some collected data). This has led to the fading of interest in the study of straining process in the zone of future earthquake. So, the approach to the earthquake prediction were focused mostly on the search for the indirect geophysical precursors and statistical analysis of the regularities of the seismic regime [Sobolev, Morozov, 1970; Kossobokov *et al.*, 1990; Sobolev, 2003; Rogozhin *et al.*, 2011; Sobolev *et al.*, 1991]. Either the areas of seismic calm [Ruzhich, 1996] or, conversely, the areas of increased seismicity concentration [Zav'yalov, 1986] are searched for.

Classification of earthquake predictions and precursors

The great amount of accumulated material on earthquake precursors has been systemized to some extent, and there are several classifications of precursors now. In 2011, E.A. Rogozhin at the conference “Earthquake prediction: are Russia and the World ready for them?”, said that the weakness of studying the precursors is that there is no special service in our country that would comprehensively monitor all the precursors. Under these conditions, all existing classifications of precursors, as well as types of prediction, are somewhat conventional.

Depending on the time of precursor appearance, the predictions are divided into long-term, mid-term and short-term. It should be noted that in practice such a division is rather conventional, especially in the case of short and mid-term precursors.

Long-term prediction is based on the peculiarities of geodynamic processes in the region, manifesting as change in the stress-strain state of the Earth's crust and associated changes in the seismic regime (such as the appearance of zones of seismic quiescence and variations of the transmitted seismic waves). Long-term sign of the earthquake source preparation may also

be the consolidation of crustal blocks and related increase of correlation radius of seismic events. As mentioned, the seismic zoning actually acts as long-term prediction of the location and strength of an earthquake.

Mid-term prediction gives an opportunity to receive a warning of a seismic event from a few weeks or months to several years. This prediction level assumes a scenario of the destruction process development in accordance with the data of seismological monitoring, as well as current observations of geophysical fields, change in the slopes of the Earth's surface, monitoring observations of the discharge and chemical composition of water sources and deep water, oil and gas wells. Formal criteria are used in assessing the statistical significance of each of the possible precursors and their complex.

The fundamentals for the mid-term precursors concept are the models describing significant increase in plastic deformation (in particular, dilatancy, i.e. volume increase at shear deformation) in the place of a future source and in surrounding zone. The most well-known models are the stick-slip, avalanche unstable fracturing formation and the dilatant-diffusion models [Sobolev, 1993; Scholz, 2002]. The relationship between the source size and the distance, at which precursors can appear, is analyzed in the summary [Dobrovolskiy, 1991]. This work proposes the consolidation source model and quantitative assessments have been obtained on its basis. In this case, phenomenological relationships, which are later used for estimating the place and magnitude of the expected earthquake, are established between the parameters of precursors and earthquakes [Drumya, 1985; Morgunov, 1999; Tikhonov, Rodkin, 2012]. But the time of the event is predicted within a characteristic interval of up to several years. Mid-term predictions provide an opportunity to refine the time estimates of the event, i.e. for a multistep prediction based on additional data for the selected “alarming” region (see below).

Short-term prediction is that with a lead time of several days to several weeks before the event. It is believed that the methods described above may still be valid [Drumya, 1985; Morgunov, 1999]. At the same time, the activation of the process of changing the strain-stress state (in particular, the foreshock series) becomes particularly

significant. Various short-term precursors, such as seismological, electromagnetic, hydrogeochemical, etc (depending on the observation method, see below) are based on the specialized physical models, general model of their occurrence can hardly be developed. For example, the widely held seismoelectric interconnection model [Hayakawa, Molchanov (eds), 2002] explains the excitation of the electromagnetic field before an earthquake with separating the charges on a contact surface along which a seismic movement will occur.

It is the short-term prediction that was the focus of the discussion about the possibility or impossibility of the earthquake prognosis according to the precursors observed [Sobolev, 1993]. The argumentation for the practical impossibility of short-term prediction was presented in the works [Koronovskii, Naimark, 2012; Koronovsky et al., 2019; Geller, 1997; Geller et al., 1997; Gufeld et al., 2011; Snieder, van Eck, 1997]. But there are also works with encouraging results on short-term predictions [Morgunov, 1999; Gavrilov, 2007; Shchekotov et al., 2015; Tikhonov et al., 2017; Hayakawa et al., 1996; Rozhnoi et al., 2009].

Ultrashort-term (operational) prediction with a lead time of several seconds to several hours is considered in some works as an extreme case of short-term predictions [Parovyshny et al., 2015]. Actually, the approaches to operational prediction solve the same problem as the methods of early detection of movements in the seismic source. Ultrashort-term prediction are relevant due to the conclusions of nonlinear dynamics about the presence of «prognosis horizon», beyond which deterministic description of behavior of complex dynamic systems is impossible [Malinetskiy, Podlazov, 1997]. For the areas of earthquake sources beyond the prediction horizon, there may be the time lag before the event of about a week, as in short-term predictions [Koronovskii, Naimark, 2012]. At the same time, mid-term predictions do not reflect the approaching of the fracture itself, but the related synchronous processes.

The methods, on the basis of which earthquake precursors are studied, are usually divided into geological, geophysical, hydrogeochemical, biological, geomechanical, seismological and biophysical.

Geological methods are used in studying the faults, and rock fracturing as one of the factors

that determine the possible location of the future earthquake.

Geophysical methods estimate density, electrical conductivity, magnetic susceptibility, P and S waves velocities, change in the intensity of electrotelluric and geomagnetic fields, etc. A special group of geophysical methods are ionospheric ones [Buchachenko et al., 1996; Molchanov, Hayakawa, 2007] which analyze changes in the total electronic content, the parameters of transmitted radio waves and other variations before earthquakes.

Hydrogeochemical methods are based on the measurement of chemical elements in groundwaters and borehole waters. The content of radon, helium, fluorine, silica and other elements is determined. Their concentrations may be used as the most typical precursors of the earthquakes coming.

Geomechanical precursors are related to rock deformation, movement of blocks and megablocks in seismic regions.

Seismological methods for identifying the precursors include determination of the ratio of velocities of P and S waves, amplitude ratios of different wave types, determination of absorption and dispersion coefficients, calculation of micro-earthquake frequency, identification of zones of temporal activity and quiescence. It would be natural to include in the same group of precursors more complex parameters, which are calculated using seismological data: parameter of seismogenic faults K_{cp} [Zav'yalov, 2006], characteristics of correlations with the phases of lunar-solar tides [Saltykov, 2016], low-frequency seismic noise ordering parameters [Lyubushin, 2011] etc.

Biological and biophysical precursors are associated with unusual animal behavior, which is believed to be caused by change in geophysical fields. These precursors suggest change in the biosphere (in particular, in the behavior of some objects) by anomalies in the Earth's geophysical fields prior to an earthquake. An example of such anomalies is the characteristics of a natural electric field in the atmosphere. The question about the reliability for biophysical (biological) precursors is even more controversial than for others.

The following series of seismological parameters are distinguished in terms of their importance:

- The parameter determined by the intersection of the compression axes in the sources of the

buried foreshocks and indicating the location of the source of preparing earthquake [Zakharova, Rogozhin, 2000, 2001, 2004];

- The parameter characterizing stress state of the medium by determining the Centroid Moment Tensor [Yunga, 1996, 1999];
- The RTL-parameter based on identifying the anomaly of seismic quiescence by three functions, which characterize a seismic regime: epicentral R , time T and energy L [Sobolev, Tyupkin, 1996, 1998];
- The parameters of earthquake flow used in the Magnitude 8 (M8) and Mendocino Scenario (MSc) algorithms [Kossobokov et al., 1990];
- The parameter S for the foreshock activation [Sobolev, 1993, 1999].

By means of a set of the most reliable long-, medium- and short-term seismological precursors, it is possible to monitor potential source zones and assess the operative situation in practice, as well to identify the periods of increased probability of earthquakes.

The “efficiency” of geophysical precursors is proved by the example of successful prediction of the 05.12.1997 Kronotsky earthquake with $M_w = 7.8$ [Zav'yalov, 2006]. This earthquake occurred in the Kamchatka region, which is well equipped with the systems of geophysical and geochemical observations for predictive indicators.

The work [Lyubushin, 2011] provides a mid-term assessment of the seismic hazard for most territory of Japan by the parameters of microseismic noise (triggered by the discharge of natural gases [Osika, 1981; Voytov, Dobrovol'skiy, 1994; Gufeld et al., 2010]). A.A. Lyubushin pointed out an increased probability of an earthquake in this area after 2010, i.e. on the eve of the 11.03.2011 Tohoku mega-earthquake with $M = 8.9$ – 9.1 .

The series of successful mid-term predictions of Sakhalin earthquakes made by I.N. Tikhonov demonstrated an important example of effective methods used for the prognosis. The mid-term earthquake prediction on the southwestern shelf of Sakhalin was made using the seismic quiescence method (detection of a seismic gap of the second kind) in 2006. This prognosis was realized in the 02.08.2007 Nevelsk earthquake with $M = 6.2$ [Tikhonov, Kim, 2010]. Also, the predictions were given for the Takoya earthquake swarm in July–September, 2001, with the strongest event on 01.09.2001 with $M = 5.6$ [Tikhonov, 2001, 2002], and the 26.09.2003 Tokachi-oki earthquake with

$M = 8.0$, $M_w = 7.3$ near Hokkaido Island, Japan [Tikhonov, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012].

In the case of the 02.08.2007 Nevelsk earthquake, I.N. Tikhonov has managed to make a successful short-term prediction based on the approaches of B. Voight and D. Varnes, and on the model of self-developing processes by A.I. Malyshchev (close to the description of “blow-up regimes” in the concept of synergy). In all these approaches, the rapid, explosive increase of foreshock activity is considered a short-term precursor of an earthquake.

The retrospective modeling of weak ($M \sim 2.0$ – 3.0) series of shallow-focus earthquakes in southern Sakhalin during the period of 2003–2014 was performed later in the summary [Tikhonov et al., 2017], using the method of self-developing processes based on the data of local network catalogue. Mathematical models of nonlinear increase of the accumulation of the shocks number before strong ($M = 4.6$ – 6.2) events were constructed. Short-term predictions of T_0 parameter (time of strong shock occurrence) were obtained with a high degree of accuracy. Stability of obtained solutions when varying the duration of processing window of the data from a catalogue was shown. It is important for further research that in the summary [Tikhonov et al., 2017] the predictions were formulated and tested; the technical requests of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations were taken into account. These requests to lead time and magnitude interval are somewhat softer than those, which has been put forward during the hopefulness period of the XX century and are still often cited when criticizing the prognosis (this means that the wider intervals of lead time and magnitude of the predicting event were allowable). If we use «practical», albeit compromise requirements for assessing the predictions by I.N. Tikhonov, we can notice that they fully satisfy the principle of verification of hypothetical prognosis of earthquakes, like fully described in the works [Evison, Rhoades, 1993, 1997].

The presence of several successful earthquake predictions in the southern Sakhalin and adjacent offshore can be attributed to a more or less homogeneous (compared to other seismic zones) distribution of the direction of main compression and tensile axes along the extended faults: West Sakhalin and Central Sakhalin ones [Tataurova, 2015; Sim et al., 2017, 2020]. In the cited works,

the result on ordering (less heterogeneity) was obtained using the data on structural and geomorphological, and seismological indicators of crustal stress state.

The regularity of the stress field is a favourable factor for the development of new methods (algorithms) of earthquake prediction or adaptation of existing ones. An illustrative example is the SeisASZ algorithm developed in the IMG FEB RAS [Zakupin, 2016] for the mid-term earthquake prediction by the anomaly of the LURR parameter (load to unload response ratio), which describes the difference in the increment of Benioff strain during the periods of two different phases of lunar tides [Yin, Yin, 1991; Lockner, Beeler, 1999; Yin *et al.*, 2001]. The LURR parameter was introduced by A.V. Nikolaev when analyzing the trigger effect of lunar-solar tides [Nikolaev, 1994; Sobolev (*ed.*), 2000]. Chinese seismologists proposed to use anomalies of this ratio (a significant difference from the unit, i.e. the value corresponding to the elastic or viscoelastic medium) as an indicator for predictions [Yin *et al.*, 1995]. The anomalous values of the LURR parameter, i.e. the significant difference in the response of the medium to the increase and the decrease of the load, indicate the stage of plastic deformation of the medium in the area of the expected earthquake, and the appearance of the zone of transcendental straining (on conventional curve of stress-strain characteristics) [Zakupin *et al.*, 2020; Rebetskiy, 2021]. Actually, the transcendental mode of straining is a sign of the future earthquake. As the fracture approaches, plastic (or transcendental) deformation becomes localized, and the LURR parameter, calculated for a large spanning volume, returns to normal values. A.S. Zakupin has shown in his works, that strong earthquakes in Sakhalin occur in a period not exceeding 2 years after the completion of the anomaly of the LURR parameter [Zakupin, 2016, Zakupin *et al.*, 2018]. Two zones, where earthquakes were predicted, had been identified in a real-time mode (not retrospectively) by means of SeisASZ algorithm. Later the following earthquakes occurred in these zones: 14.08.2016 Onor with $M_w = 5.8$ and 23.04.2017 Krylon with $M = 5.0$. Predicted values of time and magnitude corresponded to observed ones [Zakupin, Semenova, 2018]. At the meetings of the Sakhalin Branch of the Russian Expert Council on Emergency Situations both

predictions were considered as realized. Thus, this new method assisted to confirm the possibility of the earthquake prediction in the southern part of Sakhalin Island, which were mentioned earlier in the works of I.N. Tikhonov [Tikhonov, 2006, 2009; Tikhonov, Rodkin, 2012] as an amazing precedent for predictability. The LURR parameter can be considered an effective mid-term precursor.

With regard to ionospheric precursors, it is possible to mention the intermediate result – the development of a complex method of analysis of earthquake precursors at the Institute of Applied Geophysics (Roshydromet). This method uses satellite and ground-based measurements of the ionosphere total electron content, the temperature in the lower atmosphere and a number of other parameters for identifying the signs of coming shocks. It was possible to predict the time of the event with a lead time up to five days at this stage, but the place of the expected event in this case was considered known or reliably predicted by means of other methods. According to the statistics, about 60 % of these ionospheric forecasts are realized (Earthquake Forecasting Service, <https://ecoportal.su/news//70133.htviewml>). May be, it is possible to improve this system for short-term predictions of strong earthquakes.

Specialists of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources in 2012 developed a method of active monitoring, which use powerful vibrational sources creating the disturbances with load amplitude up to 100 t. Such vibrational sources allow to obtain data on the structure of the Earth's crust and, in the future, to affect the sources of preparing earthquakes for controlled stress drop, i.e. initiate weak earthquakes and obtain predictive information on strong earthquake probability.

To complete the review of the approaches to earthquake predictions, let us list the known cases of advanced predictions of strong earthquakes ($M > 5.5$). They were later confirmed and therefore considered successful (see the table below). The table also provides some retrospective predictions that have been made in the late XX – early XXI and had a significant meaning, because they have demonstrated that the criticism of the reliability of the earthquake precursors [Geller, 1991, 1997] can be overcome or reduced significantly.

Although the number of successful real-time predictions is small, but it is obviously larger than that might have been randomly guessed. This means the inconsistency, or at least the limitation, of the ideas of the fundamental unpredictability of earthquakes. Most of the predictions presented in the table are mid-term. Short-term predictions of the Haicheng and Nevelsk earthquakes were made after the mid-term ones, i.e. as a refinement when multistep prognosis. Various seismological precursors were used for all 11 examples of successful earthquake predictions, they contributed

mainly to the real-time prediction. Prediction examples of Tokachi-oki, 2003, and Shikotan, 1994, earthquakes may indicate that M8 and MSc algorithms are working, although higher efficiency is highly desirable for practice.

The table shows the seismological prediction methods to be more effective than other ones, such as geophysical (including advanced ionospheric methods), geological, and hydrogeochemical. So, the statement looks incorrect that the development of modern seismic networks had not made progress in this field.

Table. Successful predictions of the earthquakes with a magnitude $M > 5.5$

Date	M	Name (local), country	Prognosis kind, prediction parameters. References
04.02.1975	7.3	The Haicheng earthquake, Haicheng, China	<i>Foreshock sequences and other anomalies.</i> Multistep prediction, including short-term one. For a long time, this earthquake was believed to be a unique precedent of prediction, as a result of which the alarms were timely raised, and the fact of saving people who left the buildings became obvious [Raleigh et al., 1977; Wang et al., 2006]
16.08.1976	7.2	The Songnan earthquake, China	<i>Foreshock sequences.</i> Multistep prediction as in the case of Haicheng [Raleigh et al., 1977; Jones et al., 1984]
29.05.1975	7.3	The Longling earthquake, China	<i>Foreshock sequences.</i> Successful predictions of the Songnan and Longling earthquake were overshadowed by the Haicheng event, because no alarm was raised in this case. They are important as a confirmation that Haicheng is not a unique case [Raleigh et al., 1977]
04.10.1994	8.1	The Shikotan earthquake, The South Kuril Islands earthquake, Russia	<i>Predicted using the M8 algorithm</i> in the Institute of Earthquake Prediction Theory RAS [Kossobokov et al., 1990] and, independently, in the IMGG FEB RAS [Tikhonov, Rodkin, 2012]
05.12.1997	7.7	The Kronotsky earthquake, Kamchatka, Russia	Retrospective [Zav'yalov, 2006]
25.09.2003	7.3	The Tokachi-oki earthquake, Hokkaido, Japan	Retrospective [Shebalin et al., 2004; Tikhonov, 2006; Tikhonov, Rodkin, 2012]
15.11.2006	8.3	The Simushir earthquake, Kuril-Okhotsk Region, Russia	Long-term [Fedotov, 2005] Retrospective [Tikhonov et al., 2008; Shebalin, 2006]
02.08.2007	6.1	The Nevelsk earthquake, Sakhalin, Russia	Mid-term prediction by appearance of a seismic gap of the second kind and short-term prediction by increase of foreshock activity [Levin et al., 2007a, 2007b; Tikhonov, 2009; Tikhonov, Kim, 2008, 2010]
11.03.2011	9.1	The Tohoku earthquake, Japan	Mid-term, by the characteristics of seismic noise [Lyubushin, 2011]
30.01.2016	7.2	The Jupanovsky earthquake, Kamchatka, Russia	<i>Seismological, geophysical and geochemical precursors.</i> Three predictions made by different authors in real-time are considered successful [Boldina, Kopylova, 2017; Larionov et al., 2017; Firstov et al., 2017; Gavrilov et al., 2020]
14.08.2016	5.8	The Onor earthquake, Sakhalin, Russia	Mid-term prediction by the LURR parameter [Zakupin et al., 2018]

Modern approaches to the problem of earthquake prediction

Despite many years of experience in using the data on various earthquake precursors, the problem of predicting the time of earthquake has not been accomplished yet. On the one hand, there is a great amount of material on the manifestation of various precursors and there are some successes, but on the other hand, a strong earthquake occurs unexpectedly in 90 % of cases. This result shows our understanding of the mechanism of earthquake generation to be far from the real natural process (here we must agree with the authors of the work [Bakun *et al.*, 2005]). Many models of the earthquake preparation process are borrowed from mechanics, and they do not take into account the features of the structure of seismogenic regions of the Earth's crust – the fault zones [Rebetskiy, 2008].

Thus, with all the abundance of observations made and analyzed, the location, time and magnitude of future disastrous earthquakes, even in well-studied regions, remain unexpected. However, it is necessary to obtain new, additional data. But what are kinds of them? The set of possible parameters in a multi-attribute factor can be varied and broadened up to infinity, but the scope of real possibilities makes it necessary to limit it somehow.

Many researchers propose their own way to study the problem of earthquake prediction.

Some of them [Goldin *et al.*, 2001] see the main scientific problem in the fact that the process of earthquake preparation (especially its different possible scenarios) is not sufficiently understood. The main purpose of the new stage of monitoring research is to obtain data in the focal zones. This data will also contribute to a better understanding of geodynamic processes, that end with an earthquake, and to the construction of the theory of the physics of focal zones.

Others [Pevnev, 2015] believe that attempts to solve the problem of earthquake prediction without using any model of the preparation and implementation of earthquakes, but by the methods of inverse problems (using the measurement and analysis of the heterogeneous anomalies in different geophysical and other fields) have been failed due to incorrect statement of the problems. And the work [Pevnev, 2016] presents the main provisions of the deformation model of preparation of the crustal earthquake source (which has

confirmed the rationality of the Gamburtsev's way to the crustal earthquake prediction), as well as the conclusions from this model. These conclusions bring to the statement that the study of the deformations of the Earth's surface by geodetic methods makes it possible to accurately predict the location of preparing earthquake, as well as to determine the maximum power (magnitude) to be generated. In order to realize this prediction, it is necessary to create a geodetic structure on a site of the seismogenic zone, which is chosen due to various reasons, that allows to determine the type of deformations of the ground surface on the study site with necessary accuracy. This implies to establish reliably the type of elastic bending of rocks in the case, when this section is in the process of preparing an earthquake source. The work also considers such problems as prediction the strength and time of an earthquake and suggests the ways to solve them.

According to [Kissin, 2013], earthquakes need to be considered as a system that is part of a larger one – the system of geodynamic processes. The study of this natural phenomenon requires a systematic approach in order to identify the most important causal relationships. Complex studies are required in two main fields to obtain the knowledge sufficient to make a practical prediction:

- geological medium, its structure, heterogeneity and strength properties, identification of areas subjected to seismic deformations;
- the nature of the stress-strain state of the geological medium; factors affecting it; tectonic stresses, their distribution and changes by strength and parameters.

The first field is studying the medium, its properties and topology with regard to development of formalized theories of an earthquake preparation. It allows obtaining a priori information necessary for separating a study object from the environment, as well as information on the structure of medium and study object – a zone of the source formation. According to the concept of the geophysical medium of M.A. Sadovsky [Sadovskiy, 1986], which is now generally recognized, the geological medium has a block hierarchical self-similar structure, which determines the ability of the medium to accumulate, redistribute, absorb and radiate energy. Such features of the medium structure determine the specifics of seismic processes [Sadovskiy, Pisarenko, 1991].

The geological medium is highly heterogeneous, that is determined by lithology, tectonics, and presence of two-phases (solid and fluid) [Kissin, 1997]. The lithological heterogeneity of the medium causes the stark differences in the mechanical and strength properties of the rocks in the area of the forming source, which can reach up to 2–3 orders of magnitude (for example, for the Young's modulus). Therefore, the seismic process and its preparation will have their own characteristics for the sources located in the deep parts of the thick sedimentary cover in comparison with ones in the consolidated crust represented by crystalline rocks.

In addition to the features of the structure of the geological medium (i.e. internal factors), the external impacts, which can serve as triggers for dynamic movement in the source, are also important for successful earthquake prediction [Sobolev, 2011 a, b]. Trigger effects should be taken into account due to the fact that, just before an earthquake, the rock mass is in a state close to unstable equilibrium, or in other words, in near-critical condition. In the case of near-critical conditions, significant deformations can occur at small stress variations, excited, in particular, by the external impacts [Sobolev, Ponomarev, 2003; Makarov et al., 2007; Gokhberg, Kolosnitsyn, 2010]. At the same time, the conditions are produced for more intensive seismo-electromagnetic, and may be geophysical, interrelations, in particular the electromagnetic anomalies [Molchanov, Hayakawa, 2007].

The reality of trigger effects and their important role in the seismic process was confirmed in experiments on the physical simulation of the effect on the earthquake source [Sadovskiy et al., 1981; Sobolev et al., 1995; Sobolev, Ponomarev, 2003; Kuksenko et al., 2003; Avagimov et al., 2011; Buchachenko, 2014; Mubassarova et al., 2014; Bogomolov et al., 2004]. With no external (trigger) impacts, the medium presence in a metastable equilibrium state can be very long term. The transition to the destruction of the medium continuity or slippage along the fault occurs after external impact, the delay is within the range typical for short- or mid-term predictions. Thus, the control of “triggers” can improve the predictability of earthquakes. It is possible that some of the prediction given in the table above have been successful just under the conditions of trigger effect on the source of the preparing earthquake.

The work [Panteleev, Naimark, 2014] presents a review of models of tectonic earthquake preparation based on the approaches from various subject areas: mechanics of straining solids, statistical physics, mathematical statistics, nonlinear physics. Special attention is paid to the ideology of developing the models through a prism of earthquake prediction. The power and weaknesses of existing models and current trends in their development are discussed. On the basis of the review, the authors have concluded that pessimism about the possibility of predicting a strong tectonic earthquake that has taken place in the scientific community at the turn of the 20th and 21st centuries is replaced by an optimistic prospection due to new achievements in geomechanics, tectonophysics, geophysics, rock mechanics and other fields of science. The authors believe that new unique information for understanding the processes of strong earthquake preparation and development of formalized models using the approaches of mechanics of straining solids can be obtained from the development of the methods for reconstructing tectonic stresses of the seismically active areas of the Earth's crust [Rebetskiy, 2003, 2007a]; identification of a structure, activity degree of the Earth crust's fault zones [Seminskiy, 2009], as well as their activation mechanisms, including changes in the abyssal fluid regime [Sherman et al., 1999; Rodkin, Rundkvist, 2017]. The laboratory and field studies of the structure and mechanisms of deformation of inter-block contacts and faults taking the properties of their filler into account [Kocharyan, 2010; Kocharyan et al., 2011]; development of the methods of complex geophysical continuous borehole survey, that make it possible to track the change in the nature of the stress-strain state of the geological medium in the observation area [Gavrilov, 2007; Gavrilov et al., 2014, 2013] are also of great importance.

The work by Yu.L. Rebetskiy [Rebetskiy, 2008] considers the state of theories of earthquake prediction, results of natural stresses assessment and new model of a source. In particular, it is noted that many of the ideas about the process of earthquake preparation have come from the mechanics of the strength of construction materials and do not take into account the features of the structure of fault zones, which are the seismogenic domains of the Earth's crust.

According to [Rebetskiy, 2008], there is a need to talk about the faults as special geological objects, the development of which is predetermined by a set of mechanochemical processes occurring in them. These processes form a range of specific conditions of their deformation and determine the abnormal characteristics of different physical fields. Similar conclusions have been made in the works of other authors devoted to fault zones (see the references in the book [Kocharyan, 2016]).

Further, Rebetskiy proposes to develop the methods for monitoring natural stress state, which allow to obtain data on the total stress tensor in the Earth's crust and its changes (in particular, the data on stress drop in earthquake sources). Recently, the methods for reconstructing the stress field have been developed [Rebetskiy, 2003, 2007b; Angelier, 1989; Gintov, 2005]. It is necessary to estimate regularly the strength parameters of rock masses in their natural occurrences for the further development of these methods. The stresses are directly related to the destruction process and allow to give the most complete characteristic of the deformation process stage.

In the scope of analysis presented, the formation process of an abnormally extended brittle rupture (earthquake) appears as a random process depending on the combination of the areas with active mylonitization, dilatancy and metamorphism in the faults. The stresses acting in fault zones depend on the structural and compositional state of the rocks, that form them, the temperature field, the fluid regime of these zones and are determined by the regional tectonic of the Earth's crust. The geological medium is significantly heterogeneous (unlike construction materials), that "automatically" predetermines the heterogeneity of the stress field at different scale levels of averaging. As a result, the values of the components of the natural stress tensor significantly depend on the scale of averaging.

The data on stress drop in the sources of moderate earthquakes may be very important for assessing the state of faults in conditions of the stress field mosaicity [Sycheva, Bogomolov, 2016, 2020]. The decrease of stress drop level in the sources of earthquakes of the same magnitude as in the preceding period can be considered as a mid-term precursor one more. Its physical meaning is that the necessary geomechanical

condition for a strong earthquake is a lack of efficiency (compared to the usual aseismic period) of energy release and stress drop during earthquakes of low and medium magnitude. In order to test the hypothesis, a large amount of data on focal parameters (in particular, stress drop) is necessary, that became possible only in recent years [Sycheva *et al.*, 2020].

It is no doubt, that new models of the earthquake source and theoretical approaches to predictions (explaining the precursors) became the basis of new prediction methods and algorithms. But while this very non-trivial problem is at the development stage, the older but already valid methods of earthquake prediction, which were discussed in the previous section, retain their practical significance.

Foreseeing the next discussions of research prospects of earthquake predictions (including short-term ones) it is worth to cite words from the article: "At the time of Columbus, most experts asserted that one could not reach India by sailing from Europe to the west and that funds should not be wasted on such a folly" [Wyss *et al.*, 1997]. And we also want to add, that the western route to India was long and expensive, but Columbus expedition has justified the cost, after all. It is futile to refuse the scientific and social challenge of earthquake forecasting, even if one feels this goal to be unattainable.

Conclusion

A special resolution on earthquake research and predictability was adopted at the 35th General Assembly of the International Association for Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), that was held in Cape Town in January 2009, which followed after many years of discussion on the possibility (impossibility) of earthquake prediction. In this resolution, IASPEI, recognizing the opportunities that recent events offer for studying the earthquakes, recommends the scientific community to support the research on earthquake prognosis and predictability, certification and comparative testing of forecast methods.

Materials presented in the review show that although the earthquake prediction problem is still far from being resolved, there is a notable progress in the studies on it. This is confirmed by the fact that successful mid-term predictions of the time and place of an earthquake (made not

retrospectively, but in real-time) are not already unique. Development of methods and approaches for short-term earthquake prediction remains a pressing challenge that may (or may not) have an effective solution. However, there is a reason to believe that the improvement of mid-term predictive methods will bring them closer to short-term ones due to reducing the lead time of an event to the adjacent range (about a month). This trend is evident for the mid-term predictions made during the past decade.

It is important for further studies that the presence of separate seismically hazardous zones, which “permit” such predictions, has been actually revealed. One of these zones is the southern part of Sakhalin Island, where the precedent of “predictability” of earthquakes with the magnitudes $M < 7$ was noted. In these zones, as well as in the adjacent regions, new studies of the geological structure of medium, its geomechanical properties, as well as seismic process patterns for the development and improvement of approaches to earthquake predictions are most promising.

References

1. Angelier J. **1989**. From orientation to magnitude in paleo-stress determinations using fault slip data. *J. of Structural Geology*, 11(1-2): 37–49. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5)
2. Antsiferov M.S. **1969**. [On the opportunities of geoacoustic method for earthquake forecasting]. In: *Trudy vserossiyskogo simpoziuma po seysmicheskomu rezhimu (3–7 iyunya 1968 g.)* [Proceedings of the All-Russian symposium on seismic regime (June 3–7, 1968)]. Novosibirsk, 2, p. 28–141. (In Russ.).
3. Arutyunyan A.R. **2010**. [Modern methods for seismic isolation of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 3: 56–60. (In Russ.).
4. Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Okunev V.I. **2011**. Dynamics of energy exchange in model samples subjected to elastic and electromagnetic impacts. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 47(10): 919–925. <https://doi.org/10.1134/s1069351311100016>
5. Bak P., Tang C. **1989**. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B11): 15635–15637. <https://doi.org/10.1029/jb094ib11p15635>
6. Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L. et al. **2005**. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, 437(7061): 969–974. <https://doi.org/10.1038/nature04067>
7. Barsukov O.M. **1970**. [On the connection between electrical resistance of rocks and tectonic processes]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1: 84–89. (In Russ.).
8. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N., Zakupin A.S. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
9. Boldina S.V., Kopylova G.N. **2017**. Effects of the January 30, 2016, Mw=7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 863–880. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
10. Bonchkovskiy V.F. **1954**. [Changes in the gradient of electrical potential in the atmosphere as a possible precursor of earthquakes]. *Trudy Geofizicheskogo instituta*, 25(152): 192–206. (In Russ.).
11. Bormann P. **2011**. From earthquake prediction research to time-variable seismic hazard assessment applications. *Pure Applied Geophysics*, 168(1-2): 329–366. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0114-0>
12. Buchachenko A.L. **2014**. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Physics-Uspekhi*, 57: 92–98. <https://doi.org/10.3367/ufne.0184.201401e.0101>
13. Buchachenko A.L., Oraevskii V.N., Pokhotelov O.A., Sorokin V.M., Strakhov V.N., Chmyrev V.M. **1996**. Ionospheric precursors to earthquakes. *Physics-Uspekhi*, 39: 959–965.
14. Coble R.W. **1965**. The effects of the Alaskan earthquake of March 27, 1964, on ground water in Iowa. *Proceedings of the Iowa Academy of Science*, 72(1): 323–332. URL: <https://scholarworks.uni.edu/pias/vol72/iss1/48>
15. Dobrovolskiy I.P. **1991**. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [The theory of tectonic earthquake preparation]. Moscow: IFZ RAN, 218 p. (In Russ.).
16. Drumya A.V. **1985**. [Earthquake: where, when, why?]. Ed. M.A. Sadovskiy. Kishinev: Shtiintsa, 196 p. (In Russ.).
17. Evison F.F., Rhoades D.A. **1993**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 36(1): 51–60. <https://doi.org/10.1080/00288306.1993.9514553>
18. Evison F.F., Rhoades D.A. **1997**. The precursory earthquake swarm in New Zealand: Hypothesis tests. II. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*, 40(4): 537–547. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514782>
19. Fedotov S.A. **2005**. *Dolgosrochnyy seysmicheskyy prognoz dlya Kurilo-Kamchatskoy zony [Long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka zone]*. M.: Nauka, 303 p. (In Russ.).
20. Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P. **2017**. Peculiarities of subsoil gas dynamics before the M 7.2 Zhupanovo earthquake of January 30, 2016, Kamchatka. *Doklady Earth Sciences*, 472(2): 196–199. <https://doi.org/10.1134/s1028334x17020015>
21. Fujii Y. **1966**. Gravity change in the shock area of Niigata earthquake, 16 Jun. 1964. *Zisin (J. of the Seismological Society of Japan. Ser. 2)*, 19(3): 202–216. https://doi.org/10.4294/zisin1948.19.3_200
22. Gamburtsev G.A. **1955**. [Status and prospects of works in the field of earthquake forecasting]. *Bull. Soveta po seysmologii AN SSSR*, 1: 7–14. (In Russ.).
23. Gavrilov V.A. **2007**. Physical causes of diurnal variations in the geoacoustic emission level. *Doklady Earth Sciences*, 414: 638–641. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040320>
24. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. **2013**. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks. *Russian J. of Earth Science*, 13(1): 1–16. <https://doi.org/10.2205/2013es000527>

25. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V. **2014**. The physical basis of the effects caused by electromagnetic forcing in the intensity of geoacoustic processes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 50(1): 87–101. <https://doi.org/10.1134/s1069351314010042>
26. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Descherevskii, Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A. **2020**. Stress-strain state monitoring of the geological medium based on the multi-instrumental measurements in boreholes: Experience of research at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing site (Kamchatka, Russia). *Pure Applied Geophysics*, 177(1): 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
27. Geller R.J. **1991**. Shake-up for earthquake prediction. *Nature*, 352: 275–276. <https://doi.org/10.1038/352275a0>
28. Geller R.J. **1996**. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction. *Geophysical Research Letters*, 23(11): 1291–1293. <https://doi.org/10.1029/96gl00742>
29. Geller R. **1997**. Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical J. International*, 131(3): 425–450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x>
30. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. **1997**. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275(5306): 1616–1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
31. [General seismic zoning of the territory of the Russian Federation: Explanatory note to the set of the GSZ-2016 maps and list of the localities situated in seismically active zones]. **2016**. Eds V.I. Ulomov, M.I. Bogdanov. 73 p. (In Russ.). http://seismos-u.izf.ru/documents/zapiska_OCP_2016.pdf
32. Gintov O.B. **2005**. *Polevaya tektonofizika i ee primeneniye pri izuchenii deformatsiy zemnoy kory Ukrainy* [Field tectonophysics and its appliance when studying the deformation of the Earth's crust in Ukraine]. Kiev: Feniks, 572 p.
33. Goldin S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskiy Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: Strategy of earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).
34. Gokhberg M.B., Kolosnitsyn N.I. **2010**. [Trigger mechanisms of earthquakes]. In: [Trigger effects in geosystems: Proceedings of the All-Russian alignment meeting, Moscow, June 22–24, 2010]. Moscow: GEOS, p. 52–61. (In Russ.).
35. Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Aronov E.L. **1979**. On the high-frequency electromagnetic radiation associated with seismic activity. *Doklady AN SSSR*, 248(5): 1077–1081. (In Russ.).
36. Gufeld I.L., Afanasyev A.V., Afanasyeva V.V., Novoselov O.N. **2010**. Trigger effects of seismotectonic processes in a dynamically changing geological medium. *Doklady Earth Sciences*, 433(1): 901–905.
37. Gufeld I.L., Matveeva M.I., Novoselov O.N. **2011**. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2(4): 378–415. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0051>
38. Hayakawa M., Molchanov O.A. (eds.) **2002**. *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 477 p.
39. Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. **1996**. The precursory signature of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signal. *J. of Atmospheric Electricity*, 16(3): 247–257.
40. Jones L.M., Han W., Hauksson E., Jin A., Zhang Y., Luo Z. **1984**. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *Geophysical Research Letters*, 89(B9): 7697–7707. <https://doi.org/10.1029/jb089ib09p7697>
41. Kato Y., Utashiro Sh. **1949**. On the changes of the terrestrial magnetic field accompanying the great Nankaido earthquake of 1946. *Science Reports of Tohoku University, Japan. Ser. 5*, 1: 40.
42. Keylis-Borok V.I., Malinovskaya L.N. **1966**. [On one pattern in strong earthquake occurrence]. In: [Seismological research methods]. Moscow: Nauka, p. 88–97. (In Russ.).
43. Kissin I.G. **1997**. Middle and short-term precursors of earthquakes and their factors determining reliability. *J. Earthquake Prediction Research*, 6(3): 367–386.
44. Kissin I.G. **2013**. On the system approach in the problem of forecasting the earthquakes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 49: 587–600. <https://doi.org/10.1134/s1069351313040058>
45. Knopoff L. **1996**. Earthquake prediction: The scientific challenge. *Proceedings of The National Academy of Science*, 93(9): 3719–3720. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.9.3719>
46. Kocharyan G.G. **2010**. Fault zone as a nonlinear mechanical system. *Fizicheskaya. Mezomekhanika*, 13(Spec. Iss.): 5–17. (In Russ.). EDN: NQXHWN
47. Kocharyan G.G. **2016**. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 424 p. (In Russ.).
48. Kocharyan G.G., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M. **2011**. Experimental research on deformation mechanisms of low-strength thin layers of geomaterials. *Fizicheskaya. Mezomekhanika*, 14(6): 63–70. (In Russ.).
49. Koronovskii N.V., Naimark A.A. **2012**. The unpredictability of earthquakes as the fundamental result of the nonlinearity of geodynamic systems. *Moscow University Geology Bull.*, 67(6): 323–331. <https://doi.org/10.3103/s0145875212060026>
50. Koronovsky N.V., Zakharov V.S., Naimark A.A. **2019**. The short-term forecast of earthquakes: reality, scientific perspective or the project-phantom? *Moscow University Bull. Series 4. Geology*, 3: 3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-3-3-12>
51. Kosobokov V.G. **2005**. [Earthquake prediction and geodynamic processes. Pt 1. Earthquake prediction: fundamentals, realization, perspectives]. Moscow: GEOS, 172 p. (Vychislitel'naya Seismologiya; 36). (In Russ.).
52. Kosobokov V.G., Rotvayn I.M. **1977**. [Strong earthquake-prone areas recognition. VI. Magnitude M>7.0]. In: *Raspoznavanie i spektral'nyy analiz v seysmologii* [Recognition and spectral analysis in seismology]. Moscow: Nauka, p. 3–18.
53. Kosobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. **1990**. Localization of intermediate-term earthquake prediction. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(12): 19763–19772. <https://doi.org/10.1029/jb095ib12p19763>
54. Kuksenko V.S., Manzhikov B.Ts., Tilegenov K., Shatemirov Zh.K., Émil'bekov B.É. **2003**. Trigger effect of weak vibrations in solids (rocks). *Physics of the Solid State*, 45(12): 2287–2291. <https://doi.org/10.1134/1.1635499>
55. Larionov I.A., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A., Shcherbina A.O. **2017**. Research of the acoustic emission of the near-surface sedimentary rocks in Kamchatka. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(3): 57–63. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.057-063
56. Levin B.V., Sasorova E.V., Kim Ch.U., Korovin M.E., Malashenko A.E., Savochkin P.V., Tikhonov I.N. **2007a**. The Sakhalin earthquake on August 17(18), 2006, and the first realization of integrated forecast. *Doklady Earth Sciences*, 412: 117–121. <https://doi.org/10.1134/s1028334x07010278>

57. Levin B.V., Kim Choon Oon, Tikhonov I.N. **2007b**. The Gornozavodsk earthquake of August 17(18), 2006, in the south of Sakhalin Island. *Russian J. of Pacific Geology*, 1(2): 194–199.
58. Lockner D.A., Beeler N.M. **1999**. Premonitory slip and tidal triggering of earthquakes. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B9): 20133–20151. <https://doi.org/10.1029/1999jb900205>
59. Lyubushin A.A. **2011**. Japan seismic catastrophe of 11 March, 2011: Long-term prediction by microseismic noise properties. *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 10(1): 9–35. (In Russ.). URL: https://alexeylyubushin.narod.ru/Long-term_prediction_of_JapanEQ_2011_by_microseisms_RUS.pdf
60. Makarov P.V., Smolin I.Yu., Stefanov Yu.P., Kuznetsov P.V., Trubitsyn A.A., Trubitsyna N.V., Voroshilov S.P., Voroshilov Ya.S. **2007**. [Nonlinear mechanics of geomaterials and geological mediums]. Novosibirsk: GEO, 235 p.
61. Malinetskiy G.G., Podlazov A.B. **1997**. [The paradigm of self-organized criticality. Hierarchy of models and limits of predictability]. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 5(5): 89–106. (In Russ.).
62. Mamadaliev Yu.A. **1964**. [On the study of seismic regime parameters in time and space]. In: [Problems of regional seismicity in Central Asia]. Frunze: Ilim, p. 93–104. (In Russ.).
63. Mervis J. **1990**. Earthquake scientists hope that recent rumblings will lead to more funding. *The Scientist*, April 2. <https://www.the-scientist.com/news/earthquake-scientists-hope-that-recent-rumblings-will-lead-to-more-funding-61400>
64. Meshcheryakov Yu.A. **1968**. [Studying the contemporary movements of the Earth's crust and the problem of earthquake forecasting]. In: [Contemporary movements of the Earth's crust]. Moscow: VINITI, 3, p. 44–62. (In Russ.).
65. Mil'kis M.R. **1986**. [Meteorological precursors of strong earthquakes]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 3: 36–47. (In Russ.).
66. Mogi K. **1988**. *Earthquake prediction*. Transl. from Engl. (Academic Press, Tokyo, 1985). Moscow: Mir, 382 p. (In Russ.).
67. Molchanov O., Hayakawa M. **2007**. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results*. Tokyo: Terra Scientific Publ., 432 p.
68. Morgunov V.A. **1999**. [Realities of the earthquake forecast]. *Fizika Zemli*, 1: 79–91. (In Russ.).
69. Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A., Naymark O.B. **2014**. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(4): 919–938. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-4-0163>
70. Nikolaev V.A. **1994**. [Spatio-temporal features of the strong earthquake relationship with tidal phases]. In: *Navedion-naia seismichnost' [Induced seismicity]*. Moscow: Nauka, 103–114. (In Russ.).
71. Osika D.G. **1981**. [Fluid regime of seismically active regions]. Moscow: Nauka, 201 p.
72. Panteleev I.A., Naimark O.B. **2014**. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.*, 3: 44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
73. Parovyshny V.A., Senachin V.N., Veselov O.V., Kochergin E.V. **2015**. Temporal variations in geophysical fields and earthquake forecasting issues. *Geodynamics & Tectonophysics*, 6(1): 63–76. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0172>
74. Pevnev A.K. **2015**. Earthquake forecasting is possible. (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 1. Grigory A. Gamburtsev and possibility of earthquake prediction. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*, 4(22): 195–201. (In Russ.).
75. Pevnev A.K. **2016**. Earthquake forecasting is possible. (On the place of geodetic research in solving the problem of earthquake forecasting). Pt 2. Back to Grigory A. Gamburtsev's theory: Deformation model for preparation of crustal earthquake source. *Prostranstvo i Vremya = Space and Time*, 1–2(23–24): 227–238. (In Russ.). URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271provst1_2-23_24.2016.91
76. Raleigh C.B., Bennett G., Craig H., Hanks T., Molnar P., Nur A., Savage J., Scholz C., Turner R., Wu F. **1977**. Prediction of the Haicheng earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72: 236–272. <https://doi.org/10.1029/eo058i005p00236>
77. Rebetskiy Yu.L. **2003**. Development of the method of cataclastic analysis of shear fractures for tectonic stresses estimation. *Doklady Earth Sciences*, 388(1): 72–76. https://www.researchgate.net/publication/289231101_Development_of_the_method_of_cataclastic_analysis_of_shear_fractures_for_tectonic_stress_estimation
78. Rebetskiy Yu.L. **2007a**. Problems of earthquake prediction theory. Analysis of fundamentals from the perspective of a deterministic approach. *Geofizicheskii zhurnal*, 29(4): 92–110.
79. Rebetskiy Yu.L. **2007b**. *Tectonic stresses and strength of rock massifs*. Moscow: Akademkniga, 406 p.
80. Rebetskiy Yu.L. **2008**. [Current state of earthquake prediction theory. Estimation results of natural stresses and new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, p. 359–395. (In Russ.).
81. Rebetskiy Yu.L. **2021**. Concerning the theory of LURR based deterministic earthquake prediction. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(3): 192–222. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.192-208.208-222>
82. Reid H.F. (ed.) **1910**. *The California earthquake of April 18 1906*. Vol. 2. *The mechanisms of the earthquake*. Washington: Carnegie Inst. Wash.
83. Rikitake T. **1966**. A five-year plan for earthquake prediction research in Japan. *Tectonophysics*, 3(1): 1–15. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(66\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(66)90021-7)
84. Rikitake T. **1979**. [Earthquake prediction]. Moscow: Mir, 388 p. (In Russ.).
85. Rodkin M.V., Rundkvist D.V. **2017**. *Geofluid geodynamics. Application to seismology, tectonics, ore and oil genesis processes*. Dolgoprudny: Intellect, 288 p. (In Russ.).
86. Roeloffs E., Langbein J. **1994**. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Reviews of Geophysics*, 32(3): 315–335. <https://doi.org/10.1029/94rg01114>
87. Rogozhin E.A., Ioganson L.I., Zav'yalov A.D. et al. **2011**. [Potential seismic sources and seismological earthquake precursors are the basis of a real seismic forecast]. Moscow: Svetoch Plyus, 368 p. (In Russ.). EDN: THIGTP
88. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M. **2009**. Anomalies in VLF

- radio signals prior the Abruzzo earthquake ($M = 6,3$) on 6 April 2009. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 9: 1727–1732.
89. Ruzhich V.V. **1996**. [On the mid-term earthquake forecast in Pribaikal'e]. In: [*Geophysical studies in the Eastern Siberia at the turn of XXI century*]. Novosibirsk: Nauka, p. 143–147. (In Russ.).
 90. Sadvovskiy M.A. **1986**. [Self-similarity of geodynamic processes]. *Vestnik AN SSSR*, 8: 3–11. (In Russ.).
 91. Sadvovskiy M.A., Pisarenko V.F. **1991**. *Seysmicheskii protsess v blokovoy srede* [Seismic process in the block medium]. Moscow: Nauka, 96 p. (In Russ.).
 92. Sadvovskiy M.A., Mirzoev K.M., Negmatullaev S.Kh., Salomov N.G. **1981**. [Effect of mechanical vibrations on the character of plastic deformations of materials]. *Fizika Zemli*, 6: 32–42. (In Russ.).
 93. Saltykov V.A. **2016**. *Prilivnye efekty v vysokochastotnykh seysmicheskikh shumakh v seysmicheskom regione* [Tidal effects in the high-frequency seismic noises in seismic region]: [extended abstract of dr. sci. (phys. and math.) dissertation]. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova, 48 p. (In Russ.).
 94. Scholz C. **1997**. What ever happened to earthquake prediction? Reprint. with permission from *Geotimes*, vol. 17, March 1997. Copyright the American Geological Institute, 1997. URL: <https://earthquake.usgs.gov/learn/parkfield/scholz.html> (accessed 04.09.2022).
 95. Scholz C. **2002**. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 496 p.
 96. Seminskiy K.Zh. **2009**. [Tectonophysical analysis of the internal structure of the fault zones]. In: *Modern Tectonophysics. Methods and Results: Materialy pervoy molodezhnoy shkoly-seminara* [Proceedings of the First Youth School-Seminar]. Moscow: IFZ RAN, 1, p. 258–276. (In Russ.).
 97. Shchekotov A.Yu., Chebrov V.N., Berseneva N.Yu. **2015**. [Electromagnetic precursors of the Olyutor and Sea of Okhotsk earthquakes]. In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii*: Trudy 5 nauch.-tekhn. konf.: k 100-letiyu organizatsii instrumental'nykh seysmologicheskikh nablyudeniye na Kamchatke, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 27 sent. – 3 okt. 2015 goda [Problems of the complex geophysical monitoring of the Russian Far East: Proceedings of the 5th Science and Technology Conference: on the centenary of arrangement of seismological observations in Kamchatka]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: GS RAN, p. 311–315. (In Russ.).
 98. Shebalin P. **2006**. Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains. *Tectonophysics*, 424(3–4): 335–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.040>
 99. Shebalin P., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N. **2004**. Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, $M=8.1$. A case history. *Earth, Planets and Space*, 56: 715–724. <https://doi.org/10.1186/bf03353080>
 100. Sherman S.I., Seminskiy K.Zh., Cheremnykh A.V. **1999**. Destruction zones and fault-block structures of Asia. *Tikhookeanskaya geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 18(2): 41–53. (In Russ.).
 101. Sidorin A.Ya. **1992**. [Earthquake precursors]. Moscow: Nauka, 192 p. (In Russ.).
 102. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. **2017**. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(1): 181–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>
 103. Sim L.A., Kamenev P.A., Bogomolov L.M. **2020**. New data on the latest stress state of the earth's crust on Sakhalin Island (based on structural and geomorphological indicators of tectonic stress). *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 372–383. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.372-383>
 104. Simbireva I.G., Lukk A.A., Nersesov I.L. **1974**. [Change in the dynamic parameters of weak earthquake sources in the Garmskii district related to strong earthquake occurrence]. In: [*Regional studies of the seismic regime*]. Kishinev: Shtiintsa, p. 138–153. (In Russ.).
 105. Smirnova M.N. **1971**. [On the influence of weak earthquakes on the regime of Pyatigorsk mineral springs]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 7: 80–83. (In Russ.).
 106. Snieder R., van Eck T. & van Eck T. **1997**. Earthquake prediction: a political problem? *Geologische Rundschau*, 86: 446–463. <https://doi.org/10.1007/s005310050153>
 107. Sobolev G.A. **1993**. *Osnovy prognoza zemletryaseniy* [Fundamentals of the earthquake prediction]. Moscow: Nauka, 313 p. (In Russ.). EDN: TGSIGH
 108. Sobolev G.A. **1999**. [Preparation stages of Kamchatka strong earthquakes]. *Volcanology and Seismology*, 4/5: 63–72. (In Russ.). EDN: RZYUFX
 109. Sobolev G.A. (ed.) **2000**. [Natural hazards of Russia. Seismic hazards]. Moscow: Kruk, 296 p. (In Russ.).
 110. Sobolev G.A. **2003**. [The prospects of earthquake forecasting]. In: *Problemy geofiziki XXI veka* [Problems of geophysics of the XXI century]. Moscow: Nauka, p. 158–178. (In Russ.).
 111. Sobolev G.A. **2011a**. *Kontseptsiya predskazuemosti zemletryaseniy na osnove dinamiki seysmichnosti pri triggerom vozdeystvii* [The concept of predictability of the earthquakes based on the seismic dynamics under the trigger effect]. Moscow: IFZ RAN, 56 p. (In Russ.).
 112. Sobolev G.A. **2011b**. Seismicity dynamics and earthquake predictability. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
 113. Sobolev G.A., Morozov V.N. **1970**. [Local disturbances in the electric field on Kamchatka and their relation to earthquakes]. In: *Fizicheskie osnovaniya poiskov metodov prognoza zemletryaseniy* [Physical foundations for searching the methods of earthquake forecasting]. Moscow: Nauka, p. 110–121.
 114. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. *Fizika zemletryaseniy i predvestniki* [Physics of the earthquakes and the precursors]. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
 115. Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S. **1996**. Low-seismicity precursors of large earthquakes in Kamchatka. *Volcanology and Seismology*, 18(4): 433–446.
 116. Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S. **1999**. Precursory phases, seismicity precursors, and earthquake prediction in Kamchatka. *Volcanology and Seismology*, 20(6): 615–627.
 117. Sobolev G.A., Chelidze T.L., Zavyalov A.D., Slavina L.B., Nikoladze V.E. **1991**. Maps of expected earthquakes based on a combination of parameters. *Tectonophysics*, 193(4): 255–265. DOI:10.1016/0040-1951(91)90335-P
 118. Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Kol'tsov A.V. **1995**. Excitation of the oscillations in the seismic source model. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Fizika Zemli*, 12: 72–78. (In Russ.). EDN: QFFFDE
 119. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2016**. Patterns of stress drop in earthquakes of the Northern Tien Shan. *Russian*

- Geology and Geophysics*, 57(11): 1635–1645. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.009>
120. Sycheva N.A., Bogomolov L.M. **2020**. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 417–446. (In Russ.&Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>
 121. Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I. **2020**. *Computational technologies in seismological research (on the example of KNET, Northern Tien Shan)*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 358 p. <https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>
 122. Takagi A., Isibasi K., Suyekhiro S., Usami T., Matsuda T., Asada T., Yosii T., Vakita Kh., Sato Kh., Midzutani Kh. **1984**. *Metody prognoza zemletryaseniy. Ikh primeneniye v Yaponii* [Earthquake prediction techniques. Their application in Japan]. Moscow: Nedra, 287 p.
 123. Tataurova A.A. **2015**. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3: 93–101. (In Russ.).
 124. Tikhonov I.N. **2001**. [On a long-term cyclicity of the strongest ($M > 7.5$) earthquakes in the area of the South Kuril Islands]. In: *Dinamika ochagovykh zon i prognozirovaniye sil'nykh zemletryaseniy severo-zapada Tikhogo okeana* [Dynamics of the focal zones and the strongest earthquake prediction]. Yuzhno-Sakhalinsk, 1, p. 23–33. (In Russ.).
 125. Tikhonov I.N. **2002**. A law of recurrence of the time spans between sequential seismic events. *Doklady Earth Sciences*, 387(2): 250–252. (In Russ.). EDN: PSYRMC
 126. Tikhonov I.N. **2006**. [Methods of analysis of earthquake catalogues for the purposes of mid- and short-term forecasts of strong seismic events]. Vladivostok; Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 214 p. (In Russ.).
 127. Tikhonov I.N. **2009**. Prediction of strong earthquake within the southwestern shelf of Sakhalin Island and its realization during the August 2, 2007, Nevel'sk earthquake. *Russian J. of Pacific Geology*, 3(5): 429–436. <https://doi.org/10.1134/s1819714009050042>
 128. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2008**. A successful prediction of the Nevel'sk August 2, 2007, earthquake ($M_L=6.2$) in southern Sakhalin Island. *Doklady Earth Sciences*, 420(1): 704–708. <https://doi.org/10.1134/s1028334x08040417>
 129. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. **2010**. Confirmed prediction of the 2 August 2007 M_w 6.2 Nevel'sk earthquake (Sakhalin Island, Russia). *Tectonophysics*, 485(1-4): 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002>
 130. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. **2012**. The current state of art in earthquake prediction, typical precursors, and experience in earthquake forecasting at Sakhalin Island and surrounding areas. In: *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*, Ch. 5, p. 43–78. <https://doi.org/10.5772/28689>
 131. Tikhonov I.N., Vasilenko N.F., Levin Yu.N., Prytkov A.S., Frolov D.I. **2008**. [The 2006–2007 Simushir earthquakes as a new page in the history of Kuril seismically active zone]. In: [Geophysical monitoring and problems of seismic safety of the Russian Far East]: Trudy regional. nauch.-tekhn. konf. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 1, p. 215–219. (In Russ.).
 132. 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>
 133. Torunbalchi N. **2004**. Seismic isolation and energy dissipating systems in earthquake resistant design. In: *13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6*. Paper no. 3273. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3273.pdf
 134. Ulomov V.I. **1971**. *Attention! Earthquake!* Tashkent: Uzbekistan, 160 p. (In Russ.).
 135. Ulomov V.I., Mavashev B.Z. **1971**. [Precursors of the Tashkent earthquake]. In: *Tashkentskoe zemletryasenie 26 aprelya 1966 goda* [The April 26, 1966 Tashkent earthquake]. Tashkent: FAN Uzb. SSR, p. 188–192. (In Russ.).
 136. Vorob'ev A.A., Samokhvalov M.A., Gorelkin A.F. et al. **1976**. [Anomalous changes in the natural electromagnetic field intensity in the area of Tashkent prior the earthquake]. *Uzbekskiy geologicheskii zhurnal*, 2: 9–11. (In Russ.).
 137. Voytov G.I., Dobrovol'skiy I.P. **1994**. [Chemical and isotropic-carbohydrate instability of natural gas flows in the seismically active regions]. *Fizika Zemli*, 3: 20–31. (In Russ.).
 138. Wang K., Chen Q-F., Sun S., Wang A. **2006**. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. *Bull. of the Seismological Society of America*, 96(3): 757–795. <https://doi.org/10.1785/0120050191>
 139. Wyss M. et al. **1997**. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 278(5337): 487–490. <https://doi.org/10.1126/science.278.5337.487> https://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cannot%20earthquakes%20be%20predicted%3F&journal=Science&volume=278&publication_year=1997&author=Aceves%20CRL&author=Park%20CSK (accessed 05.09/2022)
 140. Yin X., Yin C. **1991**. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction. *Science in China*, 34: 977–986.
 141. Yin X.C. et al. **1995**. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145(3/4): 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>
 142. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. **2001**. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29
 143. Yunga S.L. **1996**. Retrospective analysis of temporal variations in seismic moment tensors in the Shikotan earthquake zone. In: *Federal system of seismological observations and earthquake prediction. Information and Analysis Bulletin*, 2(2): 24–40. (In Russ.).
 144. Yunga S.L. **1999**. Comparative analysis of seismotectonic deformations in regions of active geodynamic regimes. In: *Geophysics at the Century Boundary: Selected papers of scientists of the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences*. Moscow: OIFZ RAN, p. 253–264. (In Russ.).
 145. Zakharova A.I., Rogozhin E.A. **2000**. [Strong earthquakes of the northwest Pacific margin and their deep-focus precursors]. *Vestnik OGGG RAN*, 2-1(12): 82–94. (In Russ.).
 146. Zakharova A.I., Rogozhin E.A. **2001**. Deep-focus precursors of strong earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 381A(9): 1122–1123.
 147. Zakharova A.I., Rogozhin E.A. **2004**. [Spatial-temporal ratios of strong earthquakes sources and their deep-focus precursors]. In: [Geophysics researches (by the 75th anniversary of the Schmidt Institute of physics of the Earth)]. Moscow: OIFZ RAN, p. 13–19. (In Russ.).

148. Zakupin A.S. **2016**. Program complex for the analysis of instability of seismic process. *Geoinformatika*, 1: 34–43. (In Russ.).
149. Zakupin A.S., Semenova E.P. **2018**. Study of the process of preparation of strong earthquakes ($M_w > 5$) on Sakhalin using the LURR method. *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki = Bull. KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 5: 83–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
150. Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. **2018**. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ($M = 5.8$) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*, 59(11): 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>
151. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2020**. Application of methods of analysis of seismic sequences SDP and LURR for earthquake. *Geophysical Processes and Biosphere*, 19(1): 66–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
152. Zav'yalov A.D. **1986**. [Concentration criterion of seismogenic faults as a precursor of strong earthquakes]. *Volcanology and Seismology*, 3: 58–71.
153. Zav'yalov A.D. **2006**. [Middle-term earthquake prediction: fundamentals, method, realization]. Moscow: Nauka, 242 p. (In Russ.).
154. Zubkov S.I. **2002**. [Earthquake precursors]. Moscow: IFZ RAN, 140 p. (In Russ.).

Об авторах

Богомолов Леонид Михайлович (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, bleom@mail.ru

Сычева Найля Абдулловна (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, nelya@ifz.ru

About the Authors

Bogomolov, Leonid M. (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), Doctor of Physics and Mathematics, Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, bleom@mail.ru

Sycheva, Nailia A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Shmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, nelya@ifz.ru

Поступила в редакцию 05.08.2022

После рецензирования 24.08.2022

Принята к публикации 28.08.2022

Received 05 August 2022

Revised 24 August 2022

Accepted 28 August 2022