



ИТПЗ РАН

**АЛЕКСАНДР
АНАТОЛЬЕВИЧ
СОЛОВЬЕВ**
(1947-2021)



ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РАН

**АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ
СОЛОВЬЕВ**
(1947-2021)

МОСКВА
2023

УДК 55(092)

Александр Анатольевич Соловьев (1947-2021). - М.: ИТПЗ РАН, 2023. -158 с.

ISBN 978-5-6050309-2-8

Книга посвящена памяти крупнейшего российского ученого, доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН Александра Анатольевича Соловьева (1947–2021), научный путь которого неразрывно связан с Институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, который он возглавлял в течение почти 20 лет. В книге отражена многогранная научная и организаторская деятельность А.А. Соловьева и его вклад в разработку методов математической геофизики для изучения геодинамики, прогноза мест сильных землетрясений, а также развития математических методов прогнозирования экстремальных явлений в социо-экономических системах. Воспоминания его коллег, друзей и близких, согреты светлой памятью, отражают лучшие профессиональные и человеческие качества А.А. Соловьева.

Составитель

А.И. Горшков

ISBN 978-5-6050309-2-8



© ИТПЗ РАН, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	4
<i>А.И. Горшков</i> Краткая научная биография А.А. Соловьева.....	6
<i>А.Т. Исмаил-Заде</i> Моделирование динамики литосферы.....	15
<i>А.И. Горшков</i> Вклад А.А. Соловьева в проблему распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.....	50
<i>В.И. Бердышев, А.Г. Ченцов, В. В. Васин, А.Л. Агеев, А.И. Короткий, И.А. Цепелев, В.И. Максимов, Б.В. Дигас, В.Б. Костоусов, И.Н. Кандоба, В.Л. Розенберг</i> О сотрудничестве ученых Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН и Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УРО РАН	72
<i>Ан. А. Соловьев, А.К. Некрасова</i> Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности. Проект Российского научного фонда (2015-2017 гг.).....	97
<i>Giuliano Francesco Panza</i> Alexander Soloviev – a scientist and a man.....	112
<i>Джулиано Франческо Панца</i> Александр Соловьев – ученый и человек (перевод)	
<i>А.Д. Гвишиани</i> Про моего друга Сашу Соловьёва.....	134
<i>П.Н. Шебалин</i> А.А. Соловьев как начальник и как соавтор.....	139
<i>Ан.А. Соловьев</i> Мои наблюдения и ориентиры.....	145
<i>Л.М. Соловьева</i> Любимый человек	151
<i>А.А. Шатенштейн, Е.Н. Алисова, К.В. Волкова, В.Г. Трубенков</i> Одноклассники о Саше Соловьёве	155

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга посвящена памяти крупнейшего российского учёного, доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН Александра Анатольевича Соловьева, специалиста в области математической геофизики и сейсмологии. Результаты многогранной творческой деятельности А.А. Соловьева, его вклад в развитие математической геофизики широко признаны отечественной и мировой научной общественностью.

С именем А.А. Соловьева связаны прежде всего фундаментальные научные исследования по изучению природы сейсмичности методами математического моделирования, распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений, а также применению математических методов для прогноза критических событий в социо-экономических системах.

Александр Анатольевич успешно сочетал исследовательскую деятельность с большой научно-организационной работой. Почти 20 лет он возглавлял Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, был главным редактором журнала «Вулканология и сейсмология», заместителем председателя Диссертационного совета Д002.001.01 при Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, заместителем председателя Комитета РАН по системному анализу, членом Бюро Национального геофизического комитета, членом Национального комитета РАН по сбору и оценке численных данных в области науки и техники и Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, а также заместителем председателя Научного совета по проблемам сейсмологии Отделения наук о Земле РАН.

Многие исследования Александр Анатольевич проводил в кооперации с коллегами из других институтов РАН и зарубежных научных центров.

Участники совместных работ высоко ценили его профессиональные и личные качества. Когда возникла идея этой книги, мы обратились к коллегам с просьбой поделиться своими воспоминаниями о работе с Александром Анатольевичем. И было неудивительно, что все они с воодушевлением откликнулись на нашу просьбу и на страницах этой книги рассказали о своем личном опыте сотрудничества с Александром Анатольевичем и тех теплых человеческих отношениях, которые возникли в ходе совместной работы. Кроме того, своими воспоминаниями поделились друзья и родственники Александра Анатольевича.

Книга выходит в свет накануне III Всероссийской научной конференции с международным участием **«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»**, которая в этом году посвящается памяти А.А. Соловьева.

Александр Анатольевич внес значительный вклад в решение актуальных задач современной геофизики и сейсмологии, его научные идеи и начинания продолжают жить и развиваться в работах его соратников и последователей во многих отечественных и зарубежных научных организациях.

*Главный научный сотрудник ИТПЗ РАН,
д.ф.-м.н.
А.И.Горишков*

А.И. Горшков

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

КРАТКАЯ НАУЧНАЯ БИОГРАФИЯ А.А. СОЛОВЬЕВА

Соловьев Александр Анатольевич родился 21 октября 1947 г. в Москве в семье военнослужащего. В 1966 г. окончил школу № 135 и поступил на механико-математический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, который с отличием закончил в 1971 г. и поступил в очную аспирантуру Института прикладной математики АН СССР, где после окончания аспирантуры в 1974 г. работал до конца 1975 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, посвященную полуаналитическим методам расчета движения искусственных спутников Земли и Луны, а в 1991 г. — диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в которой исследована возможность генерации магнитного поля спиральным течением проводящей жидкости.



Выпуск кафедры математической логики, общих проблем управления и высшей алгебры механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 1971 г.

В 1975-1976 гг. работал в Институте проблем управления, а с декабря 1976 г. в Институте физики Земли АН СССР им. О.Ю. Шмидта в отделе вычислительной геофизики под руководством В.И. Кейлис-Борока в должности старшего научного сотрудника лаборатории прикладной математики. В 1990 г. перешел на работу в Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (МИТПАН), который был создан на базе отдела вычислительной геофизики ИФЗ РАН. Впоследствии институт стал называться Институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН). В этом институте Александр Анатольевич прошел путь от ведущего научного сотрудника до директора, которым оставался в течение почти 20 лет. В мае 2000 г. был избран членом-корреспондентом РАН по Отделению геологии, геофизики, геохимии и горных наук (специальность «геофизика, сейсмология»), состоял в Отделении наук о Земле (Секция геологии, геофизики, геохимии и горных наук). В июне 2008 г. он был награжден орденом Дружбы.



А.А. Соловьев, 2015 год

Работы А.А. Соловьева внесли значимый вклад в развитие математических методов решения ряда ключевых задач наук о твердой Земле. Им было разработано новое направление математической геофизики – математическое моделирование динамики литосферных блоков и разломов – и получены фундаментальные результаты по изучению геодинамики и ее связи с сейсмичностью. В отличие от других моделей сейсмичности блоковые модели учитывают реальное строение и геометрию разломов рассматриваемого

региона и воспроизводят его сейсмичность в пространстве и во времени. В его работах установлена связь структуры и геодинамики региона с главными характеристиками сейсмичности: группируемостью, миграцией землетрясений и удаленными взаимодействиями. Эти исследования позволяют решать задачу о восстановлении краевых условий и движущих тектонических сил, включая мантийные потоки, определяющих пространственное распределение наблюдаемой сейсмичности. С целью объяснения ключевых особенностей тектоники плит были исследованы: глобальная модель взаимодействия тектонических плит с учетом сферичности Земли; обобщенная модель дугообразной зоны субдукции; построены геодинамические модели для многих сейсмоактивных регионов мира, таких как Южные Карпаты (Вранча), Западные Альпы, Зондская островная дуга, Апеннины, Калифорния, Гималаи и Тибетское нагорье, Кавказ, Алтай-Саяны. Эти работы впервые дали количественное объяснение связи сейсмичности с геодинамикой. Подробное изложение методики и результатов моделирования динамики блоков и разломов, включая библиографию, изложены в разделе данной книги, подготовленном А.Т. Исмаил-Заде.

Другой актуальной задачей, которой Александр Анатольевич занимался на протяжении многих лет, было распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах мира. Этот подход, основанный на связи эпицентров сильных землетрясений с местами пересечения морфоструктурных линеаментов, позволяет с помощью алгоритмов распознавания образов выявлять потенциально сейсмоопасные области, в которых могут происходить сильные землетрясения. Важнейшим вкладом в эту методологию был разработанный им статистический тест для оценки случайности связи эпицентров сильных землетрясений с окрестностями пересечений линеаментов. В его работах сейсмоопасные пересечения линеаментов были определены в целом ряде сейсмоактивных регионов мира, включая Кавказ, Камчатку, горный пояс Анд, Альпы и Динариды, Пиренеи, Апеннины, Иберийский полуостров, зону сочленения

Альп и Динарид, Алтай-Саяны. Описание результатов распознавания мест сильных землетрясений, полученных А.А. Соловьевым, и библиография его работ на данную тему представлены в отдельном разделе этой книги.

Одновременно он внес вклад в разработку нового направления в развитии теории сложных систем – прогноза критических событий в социо-экономических системах. Перенос подхода к прогнозу землетрясений, основанного на анализе поведения нелинейных динамических систем, на социо-экономические системы позволил прогнозировать экономические рецессии, периоды увеличения роста безработицы и скачки тяжелой преступности. Им выполнены исследования, направленные на универсальное описание ситуаций, предшествующих экстремальным событиям в сложных системах различной природы. Рассмотрение сильных землетрясений в качестве экстремальных событий в сложной системе (литосфере Земли) приводит к идее поиска универсальных предвестников экстремальных событий, проявляющихся в сложных системах различного характера. В работе (Keilis-Borok et al., 2000) исследована модель «встречных каскадов», которая демонстрирует ряд предвестников сильных событий, ранее обнаруженных при анализе сейсмичности перед сильными землетрясениями. Смена масштабирования фоновой активности перед экстремальными событиями была найдена в различных сложных системах (Keilis-Borok et al., 2008; Keilis-Borok and Soloviev, 2010). Методология распознавания образов, которая оказалась эффективной при разработке алгоритмов прогноза землетрясений, оказалась применима также для прогноза экстремальных событий в социо-экономических системах, которые представляют собой сложные системы. Еще в 1981 году был разработан алгоритм прогноза результата выборов Президента США, который был успешно применен для прогноза выборов в последующие годы. Аналогичный подход был применен при разработке алгоритма прогноза результатов выборов в Сенат США (Keilis-Borok and Lichtman, 1993). В дальнейшем были созданы алгоритмы прогноза начала и конца экономической рецессии (Keilis-Borok et al., 2000, 2008), начала ускорения роста безработицы (Keilis-Borok et al., 2005), а также

начала роста числа тяжких преступлений в мегаполисе (Keilis-Borok et al., 2003). Обзор исследований по экстремальным событиям в социально-экономических системах представлен в публикациях (Keilis-Borok et al., 2009a, 2009b, 2016; Ghil et al., 2011).

Среди других научных результатов А.А. Соловьева важнейшим является обнаружение возможности генерации магнитного поля течением Куэтта-Пуазейля проводящей жидкости (Соловьев, 1985, 1986, 1987а, 1987б). По этой проблеме им была защищена докторская диссертация. В самом начале научной карьеры Александр Анатольевич занимался разработкой методов расчета движения искусственных спутников Земли и других небесных тел с учетом возмущений от несферичности гравитационного поля, атмосферы и других факторов, что определило новый уровень точности в определении координат спутников (Соловьев и др., 1975а, 1975б).

На протяжении большей части своей карьеры Александр Анатольевич успешно сочетал научную деятельность с преподавательской работой. В разное время он работал (по совместительству) доцентом кафедры инженерной кибернетики Московского института стали и сплавов, а также доцентом кафедры вычислительной техники и автоматической обработки аэрокосмической информации Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии.

А.А. Соловьев активно участвовал в международном научном сотрудничестве. С 1988 по 2011 г. был одним из ведущих приглашенных лекторов на международных школах по нелинейной динамике литосферы и прогнозу землетрясений, организованных Международным центром теоретической физики (г. Триест, Италия) ЮНЕСКО-МАГАТЭ для молодых ученых из развивающихся стран, а с 2007 г. по 2022 г. был содиректором этих школ. Он входил в руководящий совет проекта «Экстремальные события: причины и последствия» 6-й рамочной программы ЕС, в котором участвовали 16 научных организаций из России, Франции, Германии, Бельгии, Италии, Великобритании, Люксембурга и Румынии.



Вручение А.А. Соловьевым дипломов участникам международной школы по нелинейной динамике литосферы и прогнозу землетрясений в 1997 г., Международный центр теоретической физики, г. Триест, Италия.

Слева направо: В.Г. Розенберг, И.А. Воробьева, А.А. Соловьев

Александр Анатольевич вел большую научно-организационную работу в качестве главного редактора журнала «Вулканология и сейсмология», заместителя председателя Диссертационного совета Д002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, заместителя председателя Комитета РАН по системному анализу, члена Бюро Национального геофизического комитета, члена Национального комитета РАН по сбору и оценке численных данных в области науки и техники и Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, а также заместителя председателя Научного совета по проблемам сейсмологии Отделения наук о Земле РАН. Он входил в состав редколлегии журнала «Физика Земли», являлся экспертом РФФИ и РНФ.

Александр Анатольевич оставил богатое творческое наследие. Им опубликовано 312 научных работ, среди которых 3 монографии, 101 статья в ведущих российских и зарубежных журналах, а также 4 авторских свидетельства.

23 сентября 2021 года Александра Анатольевича не стало. Он похоронен в Москве на Троекуровском кладбище.

ЛИТЕРАТУРА

Соловьев А.А., Лидов М.Л., Ляхова В.А. Полуаналитический метод расчета движения искусственного спутника Луны // Космические исследования. 1975а. т.ХІІІ, вып.3.

Соловьев А.А., Лидов М.Л. Некоторые качественные закономерности и оценки эволюции орбит ИСЗ типа "Молния-1" // Космические исследования. 1975б. т.ХІІІ, вып.6.

Соловьев А.А. Существование магнитного динамо для динамически возможного движения проводящей жидкости // Доклады АН СССР. 1985. т.282, №1.

Соловьев А.А. Возбуждение магнитного поля течением Куэтта Пауазейля проводящей жидкости в случае границ из диэлектрика // Математические методы в сейсмологии и геодинамике / Под ред. В.И. Кейлис-Борока. М.:Наука 1986 (Вычисл.сейсмология; Вып.19).

Соловьев А.А. Возбуждение магнитного поля движением проводящей жидкости при больших значениях магнитного числа Рейнольдса // Изв.АН СССР, Физика Земли. 1987а, №5.

Соловьев А.А. Возбуждение магнитного поля спиральным течением проводящей жидкости. М.:Изд-во ИФЗ АН СССР, 1987б. 132 с.

Ghil,M., P.Yiou, S.Hallegatte, B.D.Malamud, P.Naveau, A.Soloviev, P.Friederichs, V.Keilis-Borok, D.Kondrashov, V.Kossobokov, O.Mestre, C.Nicolis, H.W.Rust, P.Shebalin, M.Vrac, A.Will, and I.Zaliapin Extreme events: dynamics, statistics and prediction. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2011, 18: 295-350, doi:10.5194/npg-18-295-2011.

Keilis-Borok,V.I., and A.J.Lichtman The self-organization of American society in presidential and senatorial elections. In Yu.A.Kravtsov (ed.), *Limits of Predictability*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1993: 223-237.

Keilis-Borok V., Stock J. H., Soloviev A., and Mikhalev P. (2000). Pre-recession pattern of six economic indicators in the USA, *Journal of Forecasting*, 19, pp. 65-80.

Keilis-Borok V.I., Gascon D.J., Soloviev A.A., Intriligator M.D., Pichardo R., and Winberg F.E. 2003. On predictability of homicide surges in megacities. In Beer, T. and Ismail-Zadeh, A. (eds.), *Risk Science and Sustainability*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 91-110.

Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A., Allègre C.B., Sobolevski A.N. Intriligator M.D. (2005). Patterns of macroeconomic indicators preceding the unemployment rise in Western Europe and the USA. *Pattern Recognition* 38(3): 423-435.

Keilis-Borok, V.I., A.A.Soloviev, M.D.Intriligator, and F.E.Winberg Pattern of macroeconomic indicators preceding the end of an American economic recession. *J. Pattern Recognition Res.*, 2008, 3, 1: 40-53, doi:10.13176/11.106.

Keilis-Borok, V., A.Gabrielov, and A.Soloviev Geo-complexity and earthquake prediction. In: Meyers R. (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, 2009a: 4178-4194, doi: 10.1007/978-0387-30440-3_246.

Keilis-Borok, V., A.Soloviev, and A.Lichtman Extreme events in socio-economic and political complex systems, predictability of. In: Meyers R. (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer, New York, 2009b: 3300-3317, doi:10.1007/978-0387-30440-3_196.

Keilis-Borok, V.I., and A.A.Soloviev Variations of trends of indicators describing complex systems: Change of scaling precursory to extreme events. *Chaos*, 2010, 20, 3: 033104, doi:10.1063/1.3463438.

Keilis-Borok, V., A.Soloviev, and A.Gabrielov On predictive understanding of extreme events: pattern recognition approach; prediction algorithms; applications to disaster preparedness. In M.Chavez, M.Ghil, and J.Urrutia-Fucugauchi (eds), *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*, Geophysical Monograph 214. American Geophysical Union, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN: 978-1-119-15701-4, 2016: 391-406.

А.Т. Исмаил-Заде

Технологический институт Карлсруэ, Германия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ

Преамбула: А.А. Соловьев – коллега, друг и добрейший человек

Воспоминания об Александре Анатольевиче (Саше) Соловьеве всегда будут самыми теплыми. Мы были не просто коллегами и со-авторами многих статей, но и друзьями. Хотя последние годы жили в разных странах и встречались не часто в Москве или за рубежом, но встречи были яркими и запоминающимися, так как Саша был настоящим русским интеллигентом, умным, чрезвычайно добрым и отзывчивым. Он был окружен любовью семьи, коллег и друзей, и одаривал любовью многих (рис. 1).



*Рис. 1. На концерте в Фестшпильхаузе Баден-Бадена в 2017 г.
Слева: Лариса и Саша Соловьевы; справа: Софья и Алик Исмаил-Заде*

С Сашей Соловьевым я познакомился в ИФЗ в 1984 г., когда впервые появился в отделе Вычислительной сейсмологии для прохождения научной стажировки. Наше научное сотрудничество началось в 1997 г., первая совместная статья была опубликована в 1999 г. [1] и последняя - в 2022 г. [2] уже после того, как Саши не стало... В середине 1990-х годов академик В.И. Кейлис-Борок предложил мне заняться задачами по нелинейной динамике литосферных плит и соединить мои исследования по геодинамике

с исследованиями сейсмичности, проводимыми А.А. Соловьевым в МИТПАНе (ныне Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН). Было понятно, что задача непростая, так как необходимо будет соединить в одной модели две временные шкалы (миллионы лет, связанные с геодинамическими процессами, и секунды-годы, связанные с землетрясениями) и две реологические модели (упругую и вязкую). Сегодня, возможно, я и не задумался бы над этими трудностями, так как мощные компьютеры и соответствующие численные методы позволяют производить такие расчеты, хотя все еще они занимают значительное компьютерное время [3]. Но тридцать лет назад, задача была практически неподъемной. И несмотря на возможные серьезные трудности, Владимир Исаакович мягко настаивал, и я в результате не устоял и согласился. В тот момент я и не думал, что моделирование динамики литосферных плит займет особое место в моих научных исследованиях. И это благодаря двум замечательным ученым – В.И. Кейлису-Борок и А.А. Соловьеву.

Саша Соловьев начал активно заниматься проблемой динамики литосферных плит в начале 1990-х годов. Он разработал идеи, заложенные в блоковой модели литосферных плит [4], и использовал блоковую модель для изучения сейсмичности в различных сейсмоактивных регионах. В частности, совместно с Дж. Панзой (ин. член РАН, Италия) и И.А. Воробьевой, А.А. Соловьев занимался моделированием сейсмичности во Вранче (юго-восточная часть Карпат) с помощью блоковой модели [5, 6]. Я же изучал напряженное состояние литосферы во Вранче с помощью численной геодинамической модели [7]. Мы решили соединить эти две модели, и с этого началось наше тесное научное сотрудничество.

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия катастрофы, связанные с сильными землетрясениями, привели к огромным людским и материальным потерям. Так, например, Суматра-Андаманское землетрясение 2004 года магнитудой

$M=9.3$ и последующее цунами в Индийском океане привело к колоссальным жертвам (~ 228000 чел.; количество жертв здесь и далее по [8]); Кашмирское землетрясение 2005 года $M=7.6$ к гибели ~ 87000 чел., а Вэньчуаньское землетрясение 2008 года $M=7.9$ и вызванные им оползни к человеческим жертвам (~ 88000 чел.) и материальному ущербу в 96 млрд. долл. США (ущерб здесь и далее по [9]). Землетрясение на Гаити 2010 года $M=7.0$ нанесло значительный ущерб национальной инфраструктуре и привело к потере ~ 223000 жизней. Великое восточно-японское землетрясение с магнитудой $M=9.0$ 2011 года спровоцировало цунами и наводнения и привело к аварии на атомной электростанции (потери: более 22500 жертв и 228 млрд. долл. США). И наконец, землетрясение $M=7.8$ в Турции в 2023 г. спровоцировало гибель ~ 50000 чел. в этой стране и соседней Сирии (данные по [10]). Хотя характеристики уязвимости и воздействия являются основными факторами бедствий [11], землетрясения являются триггерами этих бедствий, и поэтому понимание возникновения и пространственно-временного распределения экстремальных сейсмических событий может улучшить оценку опасности и способствовать подготовленности к уменьшению последствий землетрясений [12].

В данном разделе рассматривается проблема динамики литосферных блоков и возникновения землетрясений, которой А.А. Соловьев уделял большое внимание в своих научных исследованиях. Модель динамики блоков и разломов (блоковая модель), впервые предложенная Габриэловым и др. [4] и усовершенствованная А.А. Соловьевым и его коллегами, позволяет изучать локализацию сильных землетрясений в системе крупных региональных разломов и времена повторяемости этих землетрясений. Даже если мы не знаем точного времени, места и магнитуды будущего регионального землетрясения, информация о районе, где могут произойти сильные землетрясения (не обязательно там, где они произошли за всю историю наблюдений) и улучшенные оценки сейсмической опасности в этом

районе помогут в принятии соответствующих превентивных мер для снижения рисков в сейсмоактивных регионах [13,14].

В следующем разделе рассматриваются модели динамики литосферы, описывающие напряженное состояние, скольжение по разломам и возникновение землетрясений. В разделе 3 обсуждаются основные принципы и особенности блоковой модели. В разделе 4 приводятся блоковые модели, разработанные для Карпат, Тибета и Зондской островной дуги и в разделе 5 рассматривается сферическая блоковая модель, применяемая для анализа динамики глобальных тектонических плит. В заключении обсуждается использование результатов блоковых моделей для оценки сейсмической опасности.

2. МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ, РОСТА НАПРЯЖЕНИЙ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Литосфера представляет собой иерархию блоков, где самыми крупными блоками являются основные литосферные плиты [15]. Холодные жесткие литосферные плиты, подстилаемые горячей вязкой астеносферой, участвуют в относительном движении, что приводит к локализации тектонических напряжений главным образом вдоль зон разломов и к высвобождению напряжений при землетрясениях. Плиты разделяются на более мелкие блоки плоскостями разломов, ширина которых на несколько порядков меньше характерного размера разделяемых ими блоков. Смежные блоки перемещаются вдоль плоскостей разломов под контролем трения и движения плит [16]. Они скользят вдоль поверхностей, где смещения приводят к разрывам (землетрясениям) и скольжение реализуется, по сути, через образование разрывов на поверхностях разломов и их последующее заживление [17-20]. Эти движения «превращают литосферу в нелинейную иерархическую диссипативную систему, в которой сильные землетрясения являются критическими явлениями» [15]. Динамика литосферы изменяется во времени и пространстве от устойчивого состояния до катастрофы [21-24].

Упругая деформация накапливается с ростом тектонических напряжений. Когда напряжения достигают определенного уровня прочности, который блоки не могут выдержать, а величина деформации превышает силы трения, препятствующие скольжению, блоки по обе стороны разлома быстро сдвигаются по мере снятия упругих деформаций, что приводит к разрыву на разломе (землетрясению). Хотя существуют (медленные) землетрясения, высвобождающие энергию в течение нескольких часов или месяцев, в данной работе рассматриваются землетрясения, вызванные внезапным скольжением по разлому. Скольжение по разлому и возникшее землетрясение связаны с падением напряжения, за которым следует перераспределение напряжения и вязкоупругое восстановление. После этого упругие деформации снова начинают нарастать, и процесс (называемый сейсмическим циклом) повторяется на данном участке разлома. Таким образом, сейсмический цикл состоит из трех фаз скольжения: (1) меж-сейсмическая фаза, которая ведет к устойчивому накоплению упругих деформаций; (2) фаза сейсмического скольжения, когда происходит внезапный разрыв, т.е. землетрясение; и (3) фаза пост-сейсмического скольжения, характеризующаяся асейсмическим скольжением, происходящим вокруг зоны разрыва, и вязкоупругой релаксацией напряжения, вызванного землетрясением [25, 26].

За последние десятилетия был достигнут прогресс в понимании динамики литосферы, в частности, в моделировании геодинамических процессов, включая локализацию [27, 28] и перераспределение [29, 30] напряжений, сопряжение геодинамических и сейсмических процессов [1, 3, 31, 32], динамику землетрясений [2, 23, 33, 34], деформации вокруг разломов, процессы разрыва и распространение сейсмических волн вдоль разломов и систем разломов [35-37] и комплексный анализ сейсмической опасности на основе моделирования землетрясений [38]. Количественные модели эволюции напряжений и динамики землетрясений можно разделить на три типа [2]: модели генерации, локализации и передачи напряжений; модели динамических систем, воспроизводящих основные черты сейсмичности, и модели динамики разломов и сейсмичности.

Модели первого типа помогают определить области локализации значительных напряжений в сейсмоопасном регионе и/или статические, вязкоупругие и динамические изменения напряжений после землетрясения для прогнозирования потенциальных очагов последующих землетрясений. Генерация напряжений и их локализация в литосфере изучались в нескольких сейсмоопасных регионах, таких, например, как Карпаты [27] и Апеннины [28, 39]. В работе Кинга и др. [40] проанализированы изменения кулоновских напряжений, связанных с землетрясениями, и то, как эти изменения могут вызвать афтершоки. В частности, было показано, что основная афтершоковая активность хорошо совпадает с областью положительных значений изменения кулоновского напряжения [29]. Хотя модели первого типа дают представление о локализации напряжений и их изменениях перед будущими землетрясениями, эти модели пока не позволяют изучать нелинейную динамику возникновения землетрясений так подробно, как это делают модели второго типа.

Общие модели сейсмичности второго типа анализируют возникновение, кластеризацию и частоту синтетических землетрясений. Моделирование землетрясений в значительной степени опирается на теорию упругой отдачи [41], согласно которой упругие напряжения накапливаются в результате движения тектонических плит, и напряжения высвобождаются, когда они превышают прочность пород. Модель упругой отдачи дает периодическую последовательность землетрясений равной силы, хотя реальные последовательности землетрясений более сложны [42, 43]. В частности, за сильным землетрясением следует период сейсмической активизации и иногда еще одно сильное землетрясение, как это было показано с помощью нелинейной модели сейсмичности [44].

На основе лабораторных экспериментов Дитерих [45, 46] представил модель с зависящим от времени законом трения, и эта модель была развита Руиной [47] и Као и Аки [48]. Эти модели дают адекватное описание пред-сейсмического, сейсмического и пост-сейсмического скольжения по разлому

[49]. Соловьев и Максимов [43] отметили, что сложным моментом этих моделей является ее применимость к реальным зонам разломов, поскольку неясно, как масштабировать эмпирические параметры закона трения для реальных разломов, а динамика разлома в модели чувствительна к небольшим вариациям значений параметров. Пространственная неоднородность распределения прочности в плоскости разлома является важной компонентой при моделировании землетрясений [50, 51].

Некоторые модели второго типа предполагают возможность хаотических землетрясений с распределением их магнитуд по степенному закону. Берридж и Кнопофф [52] предложили простую модель для моделирования землетрясений, состоящую из блоков, соединенных между собой пружинами. Каждый блок модели взаимодействует с другими блоками, а сила, управляющая динамикой блоков, зависит от расстояния блоков от их равновесного положения и от силы трения. Несколько моделей, основанных на взаимодействии пружин и блоков [53], клеточных автоматах [54, 55], масштабной организации тектоники разломов (SOFT) [56, 57], каскадах [58] и последовательности афтершоков эпидемического типа (ETAS) [59], были разработаны позднее для воспроизведения общих свойств наблюдаемой сейсмичности.

Модель типа клеточного автомата («sandpile») [60], включающая случайную нагрузку, сброс и перераспределение напряжений, порождает лавину (или землетрясение). Данная модель обнаруживает важное свойство самоорганизованной критичности, то есть она эволюционирует к критическому состоянию из любого начального состояния, и это состояние характеризуется распределением магнитуды землетрясения по степенному закону [61].

Хотя модели второго типа довольно абстрактны и иногда сильно упрощены, они позволяют понять важные особенности сейсмичности. Между тем, только модели третьего типа, связанные с динамикой разломов, позволяют моделировать реалистичные землетрясения. Например, было

разработано несколько моделей в случае крупного неоднородного разлома [62-66] и в случае системы разломов [33, 67-74]. Результаты моделирования значительно улучшили понимание возникновения землетрясений и сейсмической опасности.

За последние несколько десятилетий космическая геодезия играет важную роль в исследованиях динамики деформации литосферы, связанной с землетрясениями. Численные модели кинематики разломов на основе геодезических данных позволили лучше понять механику цикла землетрясений [35, 36, 75]. Эти модели описывают процессы вдоль границы раздела разломов, хотя они пренебрегают неупругими свойствами окружающей области. Показано, что механическая связь между хрупкой и вязкой областями имеет важное значение во время пост- или межсейсмической деформации [76]. В частности, для моделирования динамики разломов в системе литосфера-астеносфера была разработана модель, связывающая скольжение по разломам и вязкоупругую деформацию для определения динамического распространения разрывов [77].

Деформация литосферы контролируется краткосрочным (от секунд до лет) и долгосрочным (от столетий до миллионов лет) вязкоупругим поведением мантии [78]. Чтобы понять взаимодействие между динамикой мантии и связанными с ней тектоническими напряжениями, с одной стороны, и проскальзыванием разломов и землетрясениями - с другой стороны, было разработано несколько численных подходов, учитывающих два различных временных масштаба: от миллионов лет до секунд. Исмаил-Заде и др. [1] использовали две связанные модели - конечно-элементную модель вязкого мантийного потока, вызванного опускающейся литосферной плитой [7] и вязкоупругую модель динамики литосферной плиты и разломов - для анализа того, как динамика литосферы-мантии влияет на характер землетрясений в районе Вранча. Объединение долгосрочных геодинамических процессов и краткосрочных сейсмических процессов в одной модели является сложной численной задачей, связанной с дискретизацией времени, что требует

больших вычислительных затрат. Например, Ван Динтер и др. [31] использовали геодинамическую модель субдукции и включили в нее закон ослабления трения на границе раздела плит субдукции, что позволило моделировать сейсмические циклы. Однако процессы разрыва в модели заняли значительное время по сравнению с естественными землетрясениями (от нескольких секунд до нескольких минут). Соболев и Мулдашев [32] разработали подход, аналогичный тому, что был разработан Исмаил-Заде и др. [1] в 1999 г. Они взяли геометрию геодинамической модели субдукции литосферы в качестве начального положения плиты для моделирования сейсмических циклов и изменили реологию коры и мантии в сейсмической модели, чтобы учесть переходные процессы ползучести и последовательности землетрясений.

3. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРНЫХ БЛОКОВ И РАЗЛОМОВ (БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ)

Характерной особенностью литосферы, как нелинейной иерархической сложной системы, является постоянное повторение резких изменений системы или критических переходов, т.е. землетрясений, магнитуда которых зависит от размеров слагающих ее литосферных блоков. Динамика литосферы контролируется различными физическими и химическими механизмами, влияющими на прочность литосферы, деформацию и напряжение в системах разломов, а также на возникновение землетрясений [15]. Статистические и феноменологические исследования сейсмичности, основанные на исторических и наблюдаемых землетрясениях, имеют недостаток из-за чрезвычайно короткой истории инструментальных наблюдений. Эти наблюдения охватывают период около сотни лет, что является малым периодом по сравнению со временем тектонических процессов, приводящих к локализации напряжений и возникновению землетрясений [33]. Каталоги землетрясений, созданные с помощью численного моделирования, охватывают гораздо более длительный период времени, что позволяет анализировать особенности сейсмичности.

Сейсмичность и сейсмические свойства отличаются в разных сейсмоопасных регионах, и эти различия, среди прочих факторов, могут быть связаны с тектоническими структурами (такими как разломы) и основными движущими силами, определяющими региональную динамику. Активный тектонический регион, сформировавшийся в ходе геологической истории, обычно представлен рядом взаимодействующих литосферных блоков, разделенных разломами. Хотя тектоническая энергия аккумулируется во всем объеме литосферы, высвобождение энергии при землетрясениях происходит в значительной степени вдоль относительно тонких зон разломов.

Блоковая модель представляет иерархическую структуру литосферы как набор блоков, разделенных разломами, где тектонические силы представляют механизм нагрузки, а перепады напряжений моделируют землетрясения. Блоковая модель анализирует, как наблюдаемая динамика землетрясений (а именно, сейсмический цикл, периодичность в сейсмическом режиме, распределение частоты и магнитуды землетрясений, взаимодействие между синтетическими землетрясениями и кластеризация землетрясений в пространстве и времени), а также скорость скольжения по разломам и механизмы землетрясений зависят от структуры литосферы и движущих тектонических сил. Так как математическое описание блоковой модели, ее численная дискретизация и метод решения были рассмотрены в нескольких работах Соловьева [2, 33, 34], в этой статье приводится основное описание боковой модели без деталей ее численной реализации.

Блоковая модель представляет сейсмический регион как структуру идеально жестких блоков (верхняя часть коры или литосфера), разделенных относительно тонкими и менее жесткими плоскостями разломов. Предположение о том, что литосфера моделируется идеально жесткими блоками, основано на том, что эффективные модули упругости в зонах разломов намного ниже, чем внутри блоков. Рассматриваемая в модели

структура блоков и разломов представляет собой часть слоя, ограниченную двумя горизонтальными плоскостями (см. рис. 2). Модельные разломы определяются как линии пересечения плоскостей модельных разломов с верхней горизонтальной плоскостью, аппроксимирующей рельеф поверхности. Углы наклона плоскостей разломов задаются в модели на основе знаний о глубинном строении изучаемого региона.

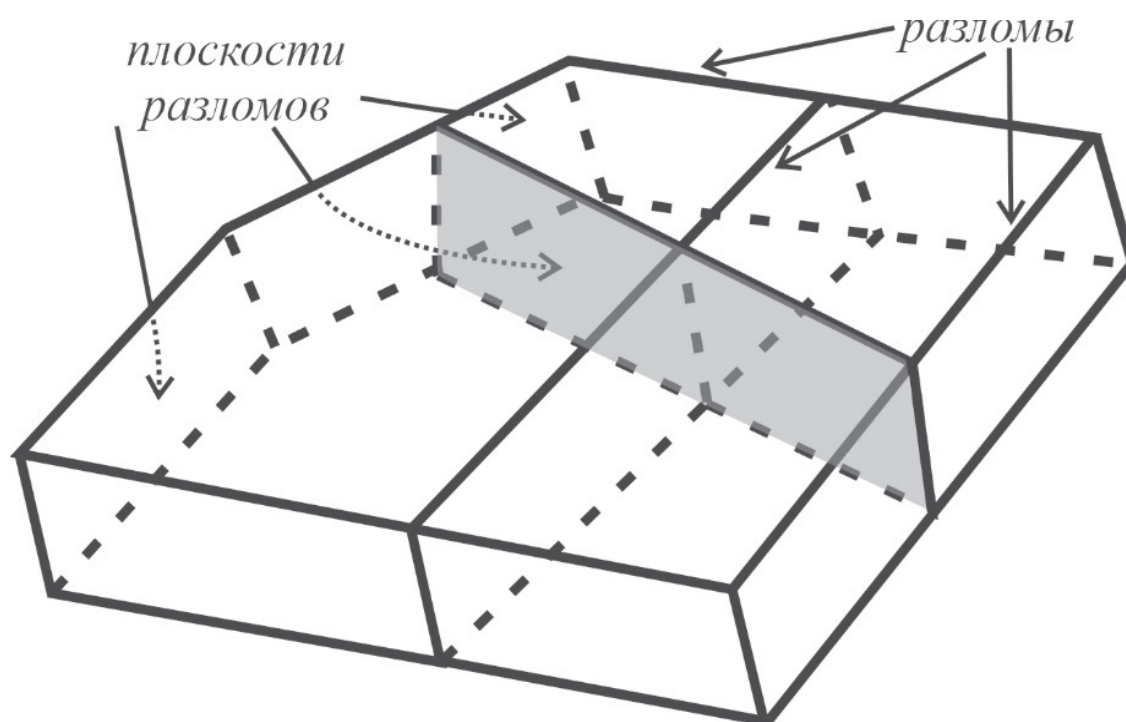


Рис. 2. Структура модельных блоков и разломов

Блоки взаимодействуют друг с другом и с подстилающей средой, которая может быть либо нижней вязкой корой, если блоки представляют верхнюю кору, либо астеносферой в случае литосферных блоков. Движения блоков предполагаются горизонтальными и являются следствием заданных движений границы блоковой структуры и подстилающей среды. Поскольку блоки идеально жесткие, предполагается, что все деформации происходят в плоскостях разломов и на нижней поверхности модельных блоков. Относительные смещения блоков происходят только вдоль плоскостей разломов. Смещения в модели приводят к локализации напряжений в

плоскостях разломов, подобно тому, как это происходит при деформации границ плит. Предполагается, что смещения бесконечно малы по сравнению с геометрическими размерами блоков, и поэтому геометрия блочной структуры не меняется во время численного моделирования. Смещения блоков определяются таким образом, чтобы структура модели находилась в состоянии квазистатического равновесия на каждом временном шаге моделирования.

Модельные блоки взаимодействуют вдоль плоскостей разлома согласно вязкоупругому закону. Эффективная вязкость зоны разлома считается либо постоянной при линейном скольжении по разлому [33], либо зависящей от скорости деформации при нелинейном скольжении по разлому. Воробьева и др. [19] показали, что скорость неупругих смещений в блоковых моделях мала и почти постоянна в меж-сейсмических фазах, и, следовательно, нет существенной разницы между зависящим от скорости деформации скольжением по разлому и линейным скольжением в модели на этих фазах сейсмического цикла. Однако после землетрясения скорость неупругих смещений увеличивается, что приводит к снижению эффективной вязкости, и эта скорость постепенно уменьшается в ходе дальнейшего численного моделирования до значений, которые были до землетрясения.

Землетрясения в блоковой модели моделируются с использованием критерия разрушения согласно кулоновским напряжениям [40] и закону сухого трения. Когда напряжения достигают критического уровня прочности в некоторой части плоскости разлома, происходит сброс напряжения в соответствии с законом сухого трения, за которым следует разрядка напряжения на плоскости разлома, которая может вызвать сброс напряжения и в других частях плоскости разлома. Перепады напряжения на плоскости модельного разлома вызывают синтетические землетрясения. Магнитуда землетрясения оценивается по эмпирической зависимости между магнитудой и площадью разрыва [79]. Сразу после землетрясения участки плоскости разлома, затронутые землетрясением, демонстрируют ползучесть, которая

характеризуется быстрым ростом неупругих смещений до тех пор, пока напряжение не упадет ниже определенного уровня. Таким образом, блоковая модель генерирует синтетические землетрясения.

Различные особенности сейсмичности этой модели были подробно проанализированы Соловьевым с со-авторами в работах [2, 23, 33, 34, 80-83]. В частности, Кейлис-Борок и др. [80] изучали зависимость синтетических землетрясений в модели от фрагментации структуры и движения границы и показали, что количество событий малой магнитуды увеличивается с фрагментацией блочной структуры, тогда как количество крупных событий может уменьшаться и увеличиваться в зависимости от движения границы. Статистические методы были использованы для анализа кластеризации [33, 81] и взаимодействия между синтетическими событиями в модели [33, 82]. Было показано, что кластеризация землетрясений зависит от геометрии структуры блоковой модели и от реологических параметров разломных зон, а взаимодействие синтетических землетрясений зависит от взаимного расположения сегментов разломов и от движений, заданных в модели. Величина b , характеризующая распределение размеров землетрясений на графиках повторяемости (закон Гутенберга-Рихтера), становится меньше перед крупными синтетическими событиями [83].

4. ПРИМЕНЕНИЕ БЛОКОВОЙ МОДЕЛИ

Блоковая модель применялась для изучения сейсмичности и статистики землетрясений в нескольких сейсмоактивных районах, таких как юго-восточные Карпаты [1, 5, 6, 69], центральный Альпийско-Гималайский пояс [84], западные Альпы [85], Зондская островная дуга [33], Тибет-Гималаи [86-88], Италия и ее окрестности [89], Качская рифтовая зона [90], Кавказ [19, 91] и Алтай–Саяны–Прибайкалье [92]. В качестве иллюстрации здесь представлены блоковые модели для Карпат, Гималайско-Тибетского региона и Зондской островной дуги.

Блоковая модель для района Вранча

Сильные землетрясения на глубинах 70-180 км происходят в районе Вранча на изгибе юго-восточных Карпат, вызывая разрушения в Румынии и сотрясая города центральной и восточной Европы на расстоянии нескольких сотен километров от эпицентров событий. Гипоцентры землетрясений локализованы в мантии в некотором объеме примерно равным 110 (глубина) $\times$ 70 $\times$ 30 км³. Считается, что эти землетрясения связаны со сбросами тектонических напряжений в реликтовой части океанической литосферы под Вранчей [93, 94].

Блоковая модель использовалась для анализа динамики литосферы и сильных землетрясений на средних глубинах в районе Вранча [1, 5, 6, 69]. На рис. 3 (модель 1; панели а-в) показано расположение Вранчи, структура блоковой модели [69], движущие силы, наблюдаемая и синтетическая сейсмичность. Параметры этой модели выбирались так, чтобы эпицентры синтетической сейсмичности совпадали с эпицентрами сейсмичности Вранчи, а также, чтобы наклон кривой повторяемости для синтетических землетрясений был ближе к наклону кривой для сейсмичности Вранчи. Каталог синтетической сейсмичности, полученный в работе [69], содержал события, рассчитанные за 7000 лет. Максимальная магнитуда синтетических землетрясений составляла 7.6, что близко к магнитуде $M=7.7$ землетрясения во Вранче в 1940 году. Модель 1, состоящая из нескольких литосферных блоков, воспроизвела основные черты наблюдаемой сейсмичности в пространстве (рис. 3в). Сильные события были сгруппированы во временные (длиной около 100-200 лет) кластеры, и эти группы появлялись со средней частотой около 300-350 лет во временных интервалах от 500 до 3000 лет и от 4000 до 7000 лет. Однако в интервале от 3000 до 4000 лет сильное землетрясение происходит примерно один раз за 100 лет.

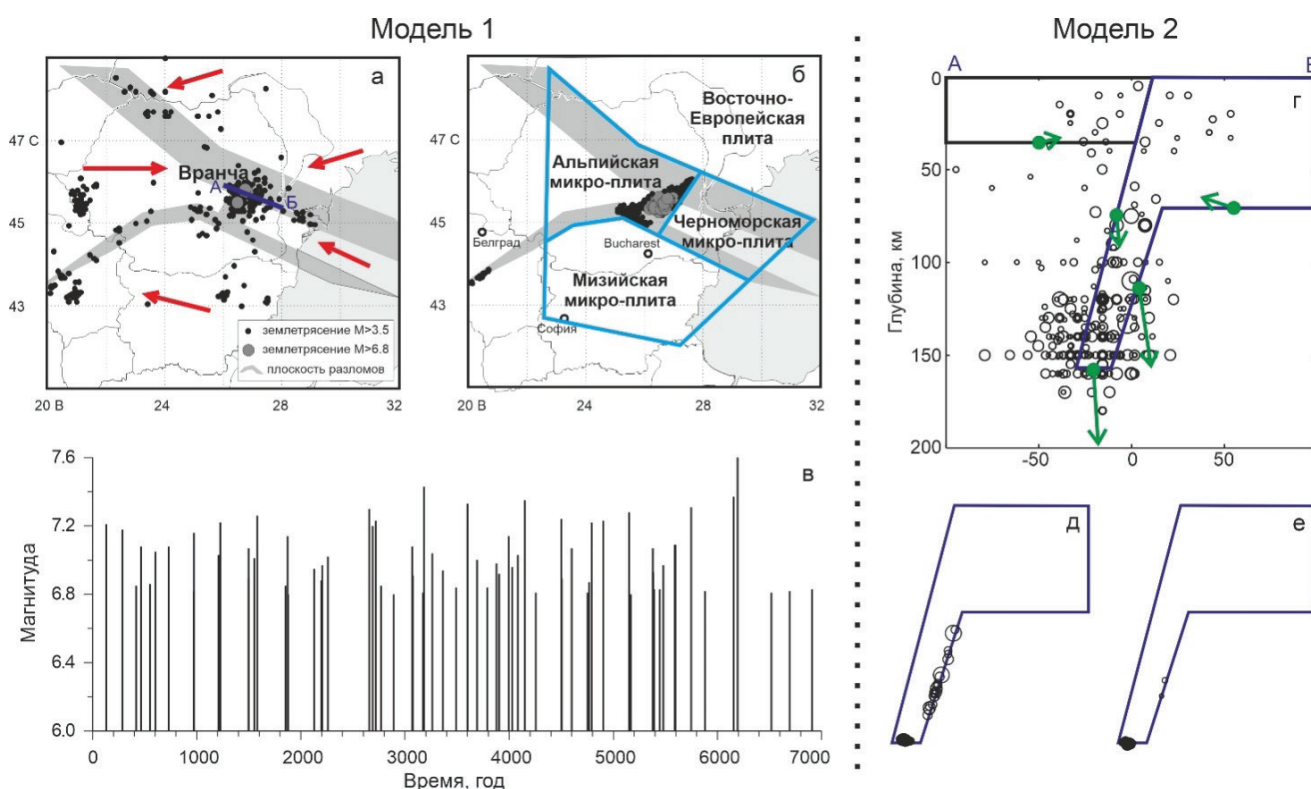


Рис. 3. Блоковые модели для региона Вранча (по [2]).

Модель 1: панели а-в (по [69]). (а) Карты наблюдаемой сейсмичности во Вранче за 1900-1995 гг. и (б) смоделированная сильная сейсмичность ($5.0 < M < 7.6$) за 7000 лет. Серые области - проекции плоскостей разломов на верхнюю плоскость; красные стрелки указывают на движения блоков в модели. Голубые линии (на панели б) - сегменты модельных разломов, разделяющие три микро-плиты (блока): Альпийская, Мизийская и Черноморская. (в) Временное распределение крупных синтетических землетрясений.

Модель 2: панели г-е (по [1]). (г) Блоково-разломная структура литосферы, содержащая опускающуюся плиту (правый блок), где гипоцентры наблюдаемой сейсмичности во Вранче спроецированы на вертикальную плоскость вдоль направления NW-SE (фиолетовая линия АБ на панели а). Зеленые стрелки обозначают среднюю скорость движения границ блоков, полученную на основе модели динамики литосферы-мантии [7]. На панелях (д) и (е) показаны крупные синтетические землетрясения для двух численных экспериментов: (д) без отката плиты (noslabrollback), т.е. без вращения правого блока против часовой стрелки, и (е) с откатом плиты (withslabrollback).

Соловьев и др. [5] проанализировали чувствительность синтетических землетрясений к параметрам блоковой модели [69] и показали, как вариации этих параметров модели влияют на пространственное распределение эпицентров, наклон кривой Гутенберга-Рихтера, уровень сейсмической активности и максимальную магнитуду синтетических землетрясений. Механизмы очагов землетрясений, генерируемых блоковой моделью для Вранчи, были проанализированы в работе Соловьева и др. [6]. Было

установлено, что механизмы крупнейших синтетических событий представляют собой надвиговые разломы, как и механизмы трех сильнейших землетрясений во Вранче в 20-м веке.

Исмаил-Заде и др. [1] использовали модель мантийного потока в качестве движущего механизма для другой блоковой модели Вранча (модель 2; см. рис. 3г-е). Скорость и направление движения литосферы были заданы на основе расчетов численной модели мантийного потока, наведенного опускающейся плитой под районом Вранча [7]. Было показано, что небольшие изменения угла наклона погружения литосферной плиты контролируют картину сейсмичности. А именно, если распределение событий с магнитудой $M > 6.8$ на рис. 3д согласуется с наблюдаемой картиной сейсмичности (рис. 3г) в правой части моделируемой плиты, то небольшое изменение направления движения плиты приводит к значительному изменению в локализации землетрясений и уменьшению магнитуды модельных событий (рис. 3е). Аналогично, Пресс и Аллен [95] на основе сейсмических наблюдений в южной Калифорнии обнаружили, что небольшие изменения в направлении движения плиты влияют на распределение сейсмических событий.

Блоковая модель для Тибет-Гималайского региона

Сейсмическая активность Тибетского плато и Гималаев связана с продолжающейся конвергенцией Индийской и Евразийской плит [96, 97]. Землетрясения в регионе происходят в основном из-за движений земной коры, ее деформации и локализации напряжений вдоль основных региональных разломов. Для изучения сейсмичности Тибет-Гималайского региона была использована блоковая модель [86], которая состояла из шести основных блоков (рис. 4), выделенных Реплумаз и Таппонье [98]. Индийская плита надвигалась на эти блоки со скоростью 4.2 см в год [99]. Были

проведены численные эксперименты для анализа распределения синтетических землетрясений, соотношения частоты и магнитуды, механизмов очагов землетрясений и относительных скоростей смещений блоков вдоль разломов. Сгенерированные каталоги землетрясений содержали события за временной интервал в 4000 лет.

Эпицентры крупных синтетических землетрясений расположены на сегментах разломов, связанных с Гималаями, а также на некоторых внутренних разломах Тибета (рис. 4). Самые крупные синтетические события в этой модели происходят вдоль левой и правой частей Гималайского надвига, Каракорума, северной части разломов Каракорум-Джиали и Сямшуй-Хэ, а также разлома Гулу. Эта блоковая модель [86] предсказала сильные сейсмические события ($M=7.6-8.0$) вдоль разлома Лонгмэньшань, где в 2008 г. произошло Вэньчуаньское землетрясение $M=7.9$. Непальское землетрясение 2015 года $M=7.8$ было связано с центральной частью Гималайского фронтального разлома, но произошло за пределами смоделированной системы разломов. Несколько сильных землетрясений ($M>8.5$) с механизмами нормального сброса были получены в этой блоковой модели, и они были связаны с рифтовой зоной Гулу. Повторяемость этих событий варьировалась от 50 до 1200 лет. Наклон графика повторяемости для синтетических землетрясений в нескольких модельных экспериментах был близок к наклону этого графика для наблюдаемой сейсмичности. Было показано, что вариации графиков повторяемости зависят от изменений в движениях блоков. В частности, вариации реологических свойств зон разломов влияют на скорости смещений блоков земной коры и на относительные смещения вдоль разломов, что может влиять на время повторяемости крупных событий [86].

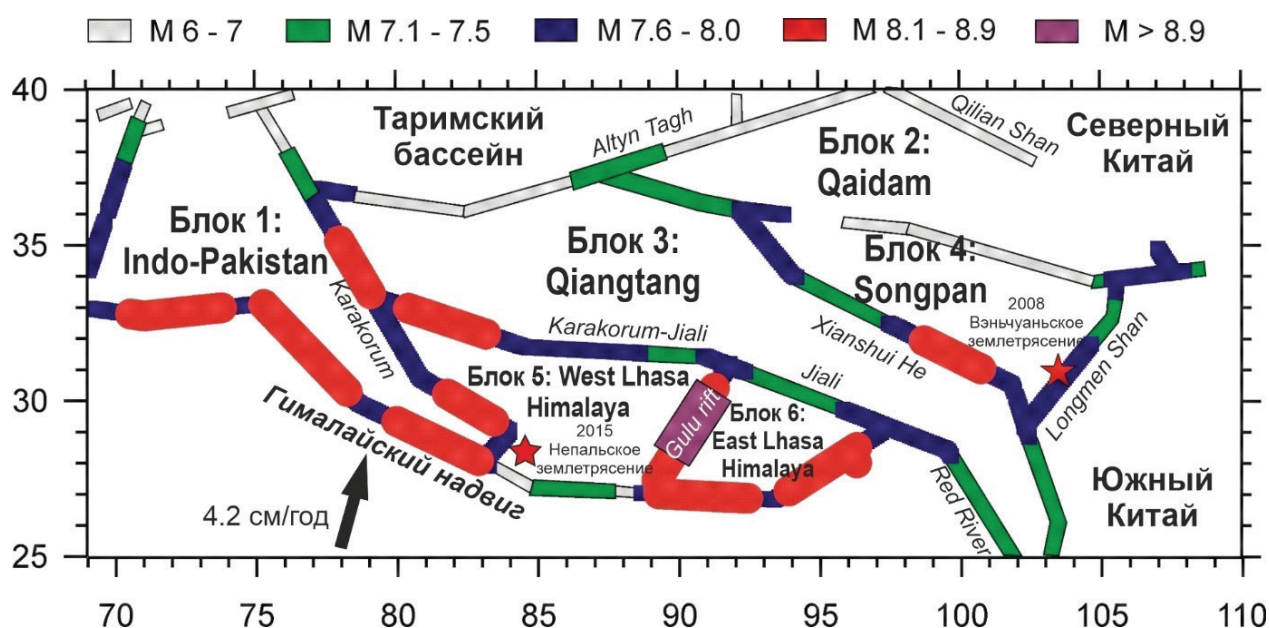


Рис. 4. Максимальные магнитуды синтетических землетрясений, сгенерированных блоковой моделью для региона Тибет-Гималаев (по [2, 86]).

Модель состоит из шести основных блоков земной коры (отмечены как блок 1- блок 6). Крупные региональные разломы разделяют эти блоки (названия разломов выделены курсивом). Черная стрелка указывает на движение Индии относительно Евразии.

Блоковая модель для Зондской островной дуги

Сейсмичность многих сейсмоопасных регионов связана с взаимодействием континентов с океаническими плитами вдоль зон субдукции. Зондская островная дуга — это активная граница конвергенции, образовавшаяся в результате субдукции Индийской и Австралийской плит под Бирманскую и Зондскую плиты [100]. Крупные землетрясения Зондской островной дуги, включая гигантское Суматра-Андаманское землетрясение 2004 года с магнитудой $M=9.3$, связаны с тектонической деформацией литосферы и локализацией напряжений в ней.

Соловьев и Исмаил-Заде [33] проанализировали сейсмичность Зондской островной дуги с помощью блоковой модели. В модели рассматривалась одноблочная структура с десятью разломами, аппроксимирующая Зондскую островную дугу, и динамика сейсмичности моделировалась в течение двухсот лет. События в модели повторяют картину региональных землетрясений (рис. 5а). Кривая кумулятивной частоты-

магнитуды для синтетического каталога довольно хорошо совпадает с кривой наблюдаемой сейсмичности, за исключением участков кривых, соответствующих магнитудам более 8 (рис. 5б). Отметим, что работа, которая обсуждается здесь, была опубликована в 2003 году, и если к статистике землетрясений добавить землетрясения, произошедшие в регионе после этого, то расхождение между двумя кривыми на хвостах кривых будет минимальным. Исмаил-Заде и др. [34] отметили, что «блоковая модель для Зондской островной дуги предсказала (в преддверии крупных событий 21 века в регионе) значительное отклонение кривой частота-магнитуда (в диапазоне магнитуд от 8 до 9+) между наблюдаемыми (1900-1999) и смоделированными сейсмическими событиями».

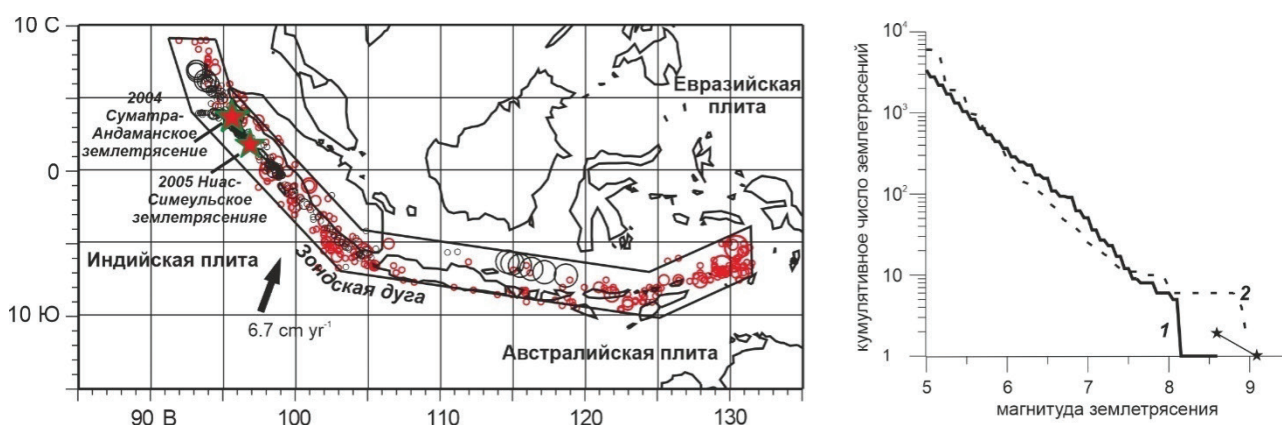


Рис. 5. Блоковая модель для Зондской островной дуги (по [2, 33]).

(а) Карты наблюдаемой сейсмичности $M > 6$ (красные открытые круги) за 1900-1999 годы и синтетической сейсмичности $M > 7$ (черные открытые круги) за 200 лет; блок модели отмечен сплошной линией.

(б) Кумулятивные графики повторяемости для наблюдаемой сейсмичности (сплошная кривая 1) и для синтетической сейсмичности с магнитудой, уменьшенной на 1 (пунктирная кривая 2). Двумя черными звездами отмечена магнитуда Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. $M=9.3$ и Ниас-Симеульского землетрясения 2005 г. $M=8.6$ (их эпицентры показаны на панели а и отмечены красными звездами).

Соловьев и Исмаил-Заде [33] выделили две области, подверженные большой сейсмичности: (i) одна в восточной части дуги и (ii) другая в ее северо-западной части, где произошло Суматра-Андаманское землетрясение

2004 года (рис. 5а). Они показали, что небольшие изменения в движении плит влияют на наклон кривой повторяемости для синтетических событий, изменяя количество малых событий, а также уменьшая максимальную магнитуду землетрясения. Аналогично, незначительное изменение геометрии модели при том же движении плиты может привести к существенному изменению картины сейсмичности.

До 2004 года никто не предполагал, что в районе Зондской островной дуги может произойти землетрясение с магнитудой более 9. По данным Раффа и Канамори [101], магнитуда землетрясения в этом регионе не может быть больше 8.5, учитывая скорость конвергенции около 6.7 см в год и возраст субдуцирующей литосферы около 80 млн. лет. Землетрясения магнитудой 9 могли произойти в более молодой (до 50 млн. лет) литосфере, погружающейся с гораздо большей скоростью 9-12 см в год. Между тем, Соловьев и Исмаил-Заде [33] показали, что в регионе можно ожидать сейсмических событий с $M > 8.5$, если учитывать два других фактора - геометрию зоны субдукции и направление движения плит, которые влияют на магнитуду землетрясений и их местоположение.

5. СФЕРИЧЕСКАЯ БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПЛИТ

Для изучения динамики крупных тектонических плит сферическая блоковая модель была введена Дигасом и др. [102] и далее развита в работах [103-105]. Литосфера была разделена на несколько тектонических плит, движущихся в соответствии с моделью скорости движения плит HS3-NUVEL1 [106]. При этом генерируются, накапливаются, концентрируются и высвобождаются тектонические напряжения вдоль основных зон разломов модели. Первоначально литосфера рассматривалась как тонкий слой, поскольку толщина литосферы значительно меньше линейных размеров литосферных плит. Хотя эта упрощенная сферическая модель снижала время численных расчетов, она не позволяла ввести пространственные размеры и

угол наклона плоскостей разломов, которые являются одними из основных параметров при определении закономерностей сейсмичности. Позже модель была модифицирована, что позволило использовать сферический слой (рис. 6а) для аппроксимации литосферы [104] и учитывать различную толщину литосферных плит и их блоков, а также зависящие от глубины вязкоупругие свойства плоскостей разломов [105]. Эти модификации модели позволили изучить динамику континентальных и океанических литосферных плит.

Розенберг [107] использовал сферическую блоковую модель для анализа динамики землетрясений и возникновения крупных событий. Модель была представлена пятнадцатью основными тектоническими плитами (рис. 6б). Синтетическая сейсмичность достаточно хорошо проявлялась в Тихоокеанском и Альпийско-Гималайском сейсмических поясах, где происходят большинство сильных землетрясений. Крупнейшие события в модели произошли на нескольких сегментах разломов примерно в тех же местах, что и в реальности. Например, два сильных землетрясения в Чили (Великое Чилийское 1960 года $M=9.5$ и Мауле 2010 года $M=8.8$) хорошо отражены в модели. Аналогично, синтетические землетрясения довольно хорошо соответствуют области Суматра-Андаманского землетрясения 2004 года $M=9.3$ и Нias-Симеульского землетрясения $M=8.6$. 2005 года. Однако, эта блоковая модель не смогла воспроизвести крупные события на некоторых разломах, расположенных в северной и восточной частях Африканской плиты. График повторяемости для глобальной сейсмичности показывает почти линейную кривую, ее наклон близок к единице (рис. 6в). Между тем, для синтетических событий суммарное количество событий низкой магнитуды и максимальная магнитуда меньше, чем в реальном каталоге землетрясений. Количество событий с малой магнитудой в синтетических каталогах связано с дискретизацией модели: чем мельче дискретизация плоскости разлома, тем больше событий с малой магнитудой можно получить, но с большими вычислительными затратами [83, 86].



Рис. 6. Сферическая блоковая модель (по [2]).

(а) Пример структуры модели; красные блоки представляют часть сферического слоя, аппроксимирующего литосферу; проекция Земли получена по снимкам NASA.

(б) Карта синтетической сейсмичности, созданная сферической моделью, показывающая эпицентры сильных землетрясений $M \geq 6$, произошедших за 100 лет, где коричневые кружки обозначают неглубокую сейсмичность (глубина < 50 км), а красные кружки - более глубокую сейсмичность (50 км $<$ глубина < 100 км). Крупнейшие синтетические события отмечены белыми звездами, а крупнейшие землетрясения за 1900-2019 годы (каталог землетрясений NEIC) - желтыми звездами. Топография и синтетическая сейсмичность построены с помощью программы SeismicEruption.

(в) Кумулятивное количество событий в зависимости от магнитуды в случае природных землетрясений (сплошная линия) и синтетических землетрясений (пунктирная линия) за один и тот же временной интервал (по данным [107]).

Для изменений динамики землетрясений стохастический компонент был введен в силы, действующие на литосферные блоки, или в физические свойства разломов сферической блоковой модели [108]. Однако для воспроизведения важных закономерностей, наблюдаемых в зарегистрированной сейсмичности, необходима калибровка модели путем настройки параметров модели в соответствии с наблюдениями [107].

Сферическая структура блоков и разломов усложняет численное моделирование по сравнению с полигональными структурами блоков.

Численные эксперименты с использованием сферической блоковой модели показали, что расчеты модели практически неразрешимы на одном компьютерном процессоре, требующем огромной памяти и колоссального времени вычислений. Например, модель с 15 тектоническими плитами и около 200 основными плоскостями разломов требует вычислений с использованием около 4 миллионов ячеек, дискретизирующих сегменты разломов и плит [109]. Наиболее трудоемкими численными процедурами являются расчеты неупругих смещений и тектонических напряжений в ячейках модели. Время вычислений и память увеличиваются при увеличении числа блоков и разломов, а также при достаточно мелкой пространственной дискретизации, позволяющей создавать в модели сейсмические события меньшей магнитуды. Между тем, основные вычисления, связанные с каждой ячейкой, выполняются независимо друг от друга, и поэтому вычислительные задания могут быть достаточно равномерно распределены между процессорами параллельного (супер)компьютера. Поэтому распараллеливание компьютерного кода для сферической блоковой модели необходимо для снижения вычислительных затрат. В частности, Розенберг [107] показал, что параллельные вычисления с использованием 50 компьютерных ядер сокращают время вычислений в 20 раз по сравнению с вычислениями на одноядерном процессоре.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Блоковая модель позволяет исследовать динамику литосферных блоков и разломов, сейсмический цикл, кластеризацию землетрясений в пространстве и времени, локализацию крупных сейсмических событий и их повторяемость. Эта модель показала, что геометрия литосферной блоково-разломной структуры и направление движущих тектонических сил существенно влияют на сейсмическую продуктивность, магнитуду землетрясений и их пространственное расположение. Блоковая модель позволяет учитывать вязкоупругое и зависящее от скорости деформации

нелинейное скольжение по разломам. Оптимизация несоответствия между наблюдаемым и смоделированным скольжением по разломам путем настройки реологических параметров плоскостей модельных разломов может помочь в прогнозировании будущей сейсмичности на разломах литосферных блоковых структур. Временной интервал между последовательными сильными сейсмическими событиями может значительно отличаться как в блоковой модели, так и в реальной сейсмичности. Поэтому время повторяемости сильных землетрясений (обычно осредненная величина) следует использовать в оценках сейсмической опасности с учетом его вариаций.

Распространенный подход к оценке сейсмической опасности основан на знании зарегистрированных и некоторых исторических данных за несколько сотен лет. Такой анализ приводит к невозможности оценить опасность экстремальных сейсмических событий, которые редки (и, следовательно, во многих случаях не регистрировались в прошлом), но их последствия в современном мире огромны. Моделирование землетрясений может стать надежным источником информации об экстремальных событиях в системах региональных разломов и повысить эффективность оценки опасности [33]. Все это потребует дальнейшего совершенствования моделирования землетрясений с помощью блоковой модели, в развитие которой А.А. Соловьев внес огромный вклад.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ismail-Zadeh AT, Keilis-Borok VI, Soloviev AA* (1999) Numerical modelling of earthquake flows in the southeastern Carpathians (Vrancea): Effect of a sinking slab. *Phys Earth Planet Inter* 111:267–274.
- [2] *Ismail-Zadeh A, Soloviev A* (2022) Numerical modelling of lithospheric block-and-fault dynamics: what did we learn about large earthquake occurrences and their frequency? *Surv Geophys* 43: 503–528.
- [3] *Dal Zilio L., Lapusta N., Avouac J.P., Gerya T.* (2022). Subduction earthquake sequences in a non-linear visco-elasto-plastic megathrust. *Geophys J Inter* 229 (2): 1098–1121.
- [4] *Gabrielov AM, Levshina TA, Rotwain IM* (1990) Block model of earthquake sequence. *Phys Earth Planet Inter* 61:18–28.
- [5] *Soloviev A, Vorobieva I, Panza G* (1999) Modelling of block-structure dynamics: parametric study for Vrancea. *Pure Appl Geophys* 156:395–420.
- [6] *Soloviev AA, Vorobieva IA, Panza GF* (2000) Modelling of block structure dynamics for the Vrancea region: source mechanisms of the synthetic earthquakes. *Pure Appl Geophys* 157:97–110.
- [7] *Ismail-Zadeh A, Panza G, Naimark B* (2000) Stress in the descending relic slab beneath the Vrancea region, Romania. *Pure Appl Geophys* 157:111–130.
- [8] *Holzer TL, Savage JC* (2013) Global earthquake fatalities and population. *Earthquake Spectra* 29(1):155–175.
- [9] CRED-UNISDR (2018) Economic Losses, Poverty & Disasters, 1998-2017. CRED & UNISDR, Geneva. Available at: <https://reliefweb.int/report/world/economic-losses-poverty-disasters-1998-2017> (retrieved on 21 May 2023).
- [10] OCHA Reliefweb (2023) Turkey-Earthquake: Emergency Situation Report (17.05.2023). Available: <https://reliefweb.int/report/turkiye/turkey-earthquake-emergency-situation-report-17052023> (retrieved on 21 May 2023).
- [11] *Ismail-Zadeh A* (2022) Natural hazards and climate change are not drivers of disasters. *Nat. Hazards* 111:2147–2154.

- [12] *Cutter S, Ismail-Zadeh A, Alcántara-Ayala I et al* (2015) Global risks: Pool knowledge to stem losses from disasters. *Nature* 522:277–279.
- [13] *Ismail-Zadeh A, Takeuchi K* (2007) Preventive disaster management of extreme natural events. *Nat Haz* 42:459–467.
- [14] *Ismail-Zadeh A, Cutter SL, Takeuchi K, Paton D* (2017) Forging a paradigm shift in disaster science. *Nat Hazards* 86:969–988.
- [15] *Keilis-Borok VI* (2003) Fundamentals of earthquake prediction: four paradigms. In: Keilis-Borok VI, Soloviev AA (eds) *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer, Heidelberg, pp 1-36.
- [16] *Rice JR* (1993) Spatio-temporal complexity of slip on a fault. *J Geophys Res* 98:9885–9907.
- [17] *Rice JR., Ben-Zion Y* (1996) Slip complexity in earthquake fault models. *Proc Nat Acad Sci USA* 93:3811–3818.
- [18] *Keilis-Borok V, Ismail-Zadeh A, Kossobokov V, Shebalin P* (2001) Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate-term earthquake prediction. *Tectonophysics* 338:247–259.
- [19] *Vorobieva I, Ismail-Zadeh A, Gorshkov A.* (2019) Nonlinear dynamics of crustal blocks and faults and earthquake occurrences in the Transcaucasian region. *Phys Earth Planet Inter* 297:106320. doi: 10.1016/j.pepi.2019.106320.
- [20] *Ben-Zion Y* (2008) Collective behavior of earthquakes and faults: Continuum-discrete transitions, evolutionary changes, and corresponding dynamic regimes. *Rev Geophys* 46:RG4006.
- [21] *Keilis-Borok VI* (1990) The lithosphere of the Earth as non-linear system with implications for earthquake prediction. *Rev Geophys* 28:19–34.
- [22] *Sornette D, Sammis CG* (1995) Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implication for earthquake prediction. *J Phys I France* 5:607–619.
- [23] *Ismail-Zadeh A, Le Mouél J-L, Soloviev A* (2012) Modeling of extreme seismic events. In: Sharma SA, Bunde A, Dimri VP, Baker DN (eds)

Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective. Geophys Monogr 196, Amer Geophys Un, Washington DC, pp 75–97.

[24] *Turcotte DL* (1999) Seismicity and self-organized criticality. Phys Earth Planet Inter 111:275–294.

[25] *Thatcher W, Rundle JB* (1984) A viscoelastic coupling model for the cyclic deformation due to periodically repeated earthquakes at subduction zones. J Geophys Res 89:7631–7640.

[26] *Cohen S* (1999) Numerical models of crustal deformation in seismic zones. Adv Geophys 41:133–231.

[27] *Ismail-Zadeh A, Mueller B, Schubert G* (2005) Three-dimensional modeling of present-day tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity observations. Phys Earth Planet Inter 149:81–98.

[28] *Ismail-Zadeh A, Aoudia A, Panza GF* (2010) Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the Central Mediterranean. Tectonophysics 482:226–236.

[29] *Stein RS* (1999) The role of stress transfer in earthquake occurrence. Nature 402:605–609.

[30] *Pollitz FF, Sacks IS* (2002) Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by transient deformation following the 1992 Landers earthquake. Bull Seismol Soc Amer 92:1487–1496.

[31] *van Dinther Y, Gerya TV, Dalguer LA, Mai PM, Morra G, Giardini D* (2013) The seismic cycle at subduction thrusts: Insights from seismo-thermo-mechanical models. J Geophys Res 118:6183–6202.

[32] *Sobolev SV, Muldashev IA* (2017) Modeling seismic cycles of great megathrust earthquakes across the scales with focus at postseismic phase. Geochem, Geophys, Geosyst 18:4387–4408. <https://doi.org/10.1002/2017GC007230>.

- [33] *Soloviev A, Ismail-Zadeh A* (2003) Models of dynamics of block-and-fault systems. In: Keilis-Borok VI, Soloviev AA (eds) *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer, Heidelberg, pp 71–138.
- [34] *Ismail-Zadeh A, Soloviev A, Sokolov V, Vorobieva I, Muller B, Schilling F* (2018) Quantitative modeling of the lithosphere dynamics, earthquakes and seismic hazard. *Tectonophysics* 746:624–647.
- [35] *Barbot S, Fialko Y, Sandwell D* (2009) Three-dimensional models of elastostatic deformation in heterogeneous media, with applications to the Eastern California Shear Zone. *Geophys J Int* 179(1):500–520.
- [36] *Jiang J, Lapusta N* (2016) Deeper penetration of large earthquakes on seismically quiescent faults. *Science* 352:1291–1297.
- [37] *Kyriakopoulos C, Oglesby DD, Rockwell TK et al* (2019) Dynamic rupture scenarios in the Brawley Seismic Zone, Salton Trough, southern California. *J Geophys Res* 124:3680–3707.
- [38] *Sokolov V, Ismail-Zadeh A* (2015) Seismic hazard from instrumentally recorded, historical and simulated earthquakes: Application to the Tibet-Himalayan region. *Tectonophysics* 657:187–204.
- [39] *Aoudia A, Ismail-Zadeh AT, Romanelli F* (2007) Buoyancy-driven deformation and contemporary tectonic stress in the lithosphere beneath Central Italy. *Terra Nova* 19:490–495.
- [40] *King GCP, Stein RS, Lin J* (1994) Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seismol Soc Amer* 84:935–953.
- [41] *Reid HF* (1910) Permanent displacements of the ground in The California Earthquake of April 18, 1906. In: *Report of the State Earthquake Investigation Commission*, vol 2. Carnegie Institution of Washington, Washington DC, pp 16–28.
- [42] *Thatcher W* (1990) Order and diversity in the models of circum-Pacific earthquake recurrence. *J Geophys Res* 95:2609–2623.

- [43] *Soloviev AA, Maksimov VI* (2001) Block models of lithosphere dynamics and Seismicity. IIASA Interim Report. IIASA, Laxenburg, Austria: IR-01-067.
- [44] *Newman WI, Knopoff L* (1982) Crack fusion dynamics: a model for large earthquakes. *Geophys Res Lett* 9:735–738.
- [45] *Dieterich JH* (1972) Time-dependent friction in rocks. *J Geophys Res* 77:3690–3697.
- [46] *Dieterich JH.* (1978) Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. *Pure Appl Geophys* 116:790–806.
- [47] *Ruina A* (1983) Slip instability and state variables friction laws. *J Geophys Res* 88:10359–10370.
- [48] *Cao T, Aki K* (1986) Seismicity simulation with a rate- and state-dependent law. *Pure Appl Geophys* 124:487–514.
- [49] *Tse S, Rice JR* (1986) Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *J Geophys Res* 91:9452–9472.
- [50] *Das S, Aki K* (1977) Fault planes with barriers: a versatile earthquake model. *J Geophys Res* 82:5648–5670.
- [51] *Kanamori H, Stewart GS* (1978) Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976. *J Geophys Res* 83:3427–3434.
- [52] *Burridge R, Knopoff L* (1967) Model and theoretical seismicity. *Bull Seismol Soc Am* 58:341–371.
- [53] *Narkounskaia G, Huang J, Turcotte D* (1992) Chaotic and self-organized critical behaviour of a generalized slider-block model. *J Stat Phys* 67:1151–1183.
- [54] *Nakanishi H* (1991) Statistical properties of the cellular-automaton model for earthquakes. *Phys Rev* 43:6613–6621.
- [55] *Rundle JB, Klein W* (1993) Scaling and critical phenomena in a cellular automaton slider block model for earthquakes. *J Stat Phys* 72:405–412

- [56] *Allègre CJ, Le Mouél J-L, Duyen H, Narteau C* (1995) Scaling organization of fracture tectonics (S.O.F.T.) and earthquake mechanism. *Phys Earth Planet Inter* 92:215–233.
- [57] *Shebalin P, Soloviev A, Le Mouél J-L* (2002) Scaling organization in the dynamics of blocks-and-faults systems. *Phys Earth Planet Inter* 131:141–153.
- [58] *Zaliapin I, Keilis-Borok V, Ghil M* (2003) A Boolean delay model of colliding cascades. II: Prediction of critical transitions. *J Stat Phys* 111:839–861.
- [59] *Ogata Y* (1988) Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *J Amer Stat Assoc* 83:9–27.
- [60] *Bak P, Tang C* (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J Geophys Res* 94:15635–15637.
- [61] *Gabrielov A, Newman WI* (1994) Seismicity modeling and earthquake prediction: A review. In: Newman WI, Gabrielov A, Turcotte DL (eds) *Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena*. *Geophys Monogr* 83, IUGG Volume 18, Amer Geophys Un, Washington DC, pp 7–13.
- [62] *Ben-Zion Y, Rice JR* (1993) Earthquake failure sequence along a cellular fault zone in a three-dimensional elastic solid containing asperity and nonasperity regions. *J Geophys Res* 98:14109–14131.
- [63] *Lyakhovsky V, Ben-Zion Y, Agnon A* (2001) Earthquake cycle, fault zones, and seismicity patterns in a rheologically layered lithosphere. *J Geophys Res* 106:4103–4120.
- [64] *Zöller G, Hainzl S, Holschneider M, Ben-Zion Y* (2005) Aftershocks resulting from creeping sections in a heterogeneous fault. *Geophys Res Lett* 32:L03308.
- [65] *Lapusta N, Liu Y* (2009) Three-dimensional boundary integral modeling of spontaneous earthquake sequences and aseismic slip. *J Geophys Res* 114:B09303.
- [66] *Nodal H, Lapusta N* (2010) Three-dimensional earthquake sequence simulations with evolving temperature and pore pressure due to shear heating: Effect of heterogeneous hydraulic diffusivity. *J Geophys Res* 115:B12314.

[67] *Ward SN* (1992) An application of synthetic seismicity in earthquake statistics: The Middle America Trench. *J Geophys Res* 97:6675–6682.

[68] *Ward SN* (1996) A synthetic seismicity model for southern California: Cycles, probabilities, hazards. *J Geophys Res* 101: 22393–22418.

[69] *Panza G, Soloviev A, Vorobieva I* (1997) Numerical modelling of block-structure dynamics: application to the Vrancea region. *Pure Appl Geophys* 149:313–336.

[70] *Ward SN* (2000) San Francisco Bay Area earthquake simulation: A step toward a standard physical earthquake model. *Bull Seismol Soc Am* 90:370–386.

[71] *Fitzenz DD, Miller SA* (2001) A forward model for earthquake generation on interacting faults including tectonics, fluids, and stress transfer. *J Geophys Res* 106:26689–26706.

[72] *Rundle PB, Rundle JB, Tiampo KF, Donnellan A, Turcotte DL* (2006) Virtual California: Fault model, frictional parameters, application. *Pure Appl Geophys* 163:1819–1846.

[73] *Zhou S, Johnston S, Robinson R, Vere-Jones D* (2006) Tests of the precursory accelerating moment release model using a synthetic seismicity model for Wellington, New Zealand. *J Geophys Res* 111:B05308.

[74] *Bielak J, Graves R, Olsen K et al* (2010) The ShakeOut earthquake scenario: verification of three simulation sets. *Geophys J Int* 180:375–404.

[75] *Kaneko Y, Avouac JP, Lapusta N* (2010) Towards inferring earthquake patterns from geodetic observations of inter seismic coupling. *Nature Geosc* 3: 363–369.

[76] *Johnson KM, Segall P* (2004) Viscoelastic earthquake cycle models with deep stress-driven creep along the San Andreas Fault system. *J Geophys Res* 109:B10403.

[77] *Lambert V, Barbot S* (2016) Contribution of viscoelastic flow in earthquake cycles within the lithosphere-asthenosphere system. *Geophys Res Lett* 43:10,142–10,154.

[78] *Wang K, Hu Y, He J* (2012) Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic Earth. *Nature* 484:327–332, doi:10.1038/nature11032.

[79] *Wells DL, Coppersmith KJ* (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Am* 84:974–1002.

[80] *Keilis-Borok VI, Rotwain IM, Soloviev AA* (1997) Numerical modelling of block structure dynamics: dependence of a synthetic earthquake flow on the structure separateness and boundary movements. *J Seismol* 1:151–160.

[81] *Maksimov VI, Soloviev AA* (1999) Clustering of earthquakes in a block model of lithosphere dynamics. *Comput Seism Geodyn* 4:124–126.

[82] *Vorobieva I, Soloviev A* (2005) Long-range interaction between synthetic earthquakes in the block model of lithosphere dynamics. *Comput Seism Geodyn* 7:170–177.

[83] *Soloviev AA* (2008) Transformation of frequency-magnitude relation prior to large events in the model of block structure dynamics. *Nonlin Proc Geophys* 15:209–220.

[84] *Sobolev PO, Soloviev AA, Rotwain IM* (1999) Modeling the lithosphere dynamics and seismicity for the Near East. *ComputSeismGeodyn* 4:115–123.

[85] *Воробьева И.А., Горшков А.И., Соловьев А.А.* Моделирование динамики блоковой структуры и сейсмичности Западных Альп // Проблемы динамики и сейсмичности Земли. М.: ГЕОС, 2000. С.154-169 (Вычисл. сейсмология; Вып. 31).

[86] *Ismail-Zadeh AT, Le Mouél J-L, Soloviev A, Tapponnier P, Vorobieva I* (2007) Numerical modelling of crustal block-and-fault dynamics, earthquakes and slip rates in the Tibet-Himalayan region. *Earth Planet Sci Lett* 258:465–485.

[87] *Vorobieva I, Mandal P, Gorshkov A* (2017) Block-and-fault dynamics modelling of the Himalayan frontal arc: Implications for seismic cycle, slip deficit, and great earthquakes. *J Asian Earth Sci* 148:131–141.

[88] *Vorobieva I, Gorshkov A, Mandal P* (2021) Modelling the seismic potential of the Indo-Burman megathrust. *Sci Rep* 11:21200.

[89] *Peresan A, Vorobieva I, Soloviev A, Panza GF* (2007) Simulation of Seismicity in the Block-structure Model of Italy and its Surroundings. *Pure Appl Geophys* 164:2193–2234.

[90] *Vorobieva I, Mandal P, Gorshkov A* (2014) Numerical modeling of seismicity and geodynamics of the Kachchh rift zone, Gujarat, India. *Tectonophysics* 634:31–43.

[91] *Soloviev AA, Gorshkov AI* (2017) Modeling the dynamics of the block structure and seismicity of the Caucasus. *Izv, Phys Solid Earth* 53:321–331.

[92] *Соловьев А.А., Горшков А.И.* (2021). Моделирование сейсмичности региона Алтай–Саяны–Прибайкалье // Доклады Российской академии наук. Т. 501. № 2. С. 204-209.

[93] *Ismail-Zadeh A, Matenco L, Radulian M, Cloetingh S, Panza G* (2012b) Geodynamic and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): Current state-of-the-art. *Tectonophysics* 530-531:50–79.

[94] *Petrescu, P., Borleanu, F., Radulian, M., Ismail-Zadeh, A., Matenco, L.* (2021) Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: Insights into intermediate-depth earthquake nests in locked collisional settings. *Tectonophysics* 799:228688.

[95] *Press F, Allen C* (1995) Pattern of seismic release in the southern California region. *J Geophys Res* 100:6421–6430.

[96] *Barazangi M, Ni J* (1982) Velocities and propagation characteristics of Pn and Sn beneath the Himalayan arc and Tibetan plateau: possible evidence for underthrusting of Indian continental lithosphere beneath Tibet. *Geology* 10:179–185.

[97] *Le Pichon X, Fournier M, Jolivet L* (1992) Kinematics, topography, shortening, and extrusion in the India –Eurasia collision. *Tectonics* 11:1085–1098.

[98] *Replumaz A, Tapponnier P* (2003) Reconstruction of the deformed collision zone between Indian and Asia by backward motion of lithospheric blocks. *J Geophys Res* 108: 2285. doi: 10.1029/2001JB000661.

[99] *Bilham R, Larson K, Freymueller J, Project Idylhim members* (1997) GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalayas. *Nature* 386:61–64.

[100] *Widiyantoro S, van der Hilst R* (1996) Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda arc, Indonesia. *Science* 271:1566–1570.

[101] *Ruff L, Kanamori H* (1980) Seismicity and the subduction process. *Phys Earth Planet Inter* 23:240–252.

[102] *Digas BV, Rozenberg VL, Soloviev AA, Sobolev PO* (1999) Spherical model of block structure dynamics. Fifth Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction, 4-22 October 1999, Trieste, ICTP, H4.SMR/1150-5, 20 pp.

[103] *Melnikova LA, Rozenberg VL, Sobolev PO, Soloviev AA* (2004) Numerical modeling of tectonic plate dynamics: A spherical model. *Comput Seism Geodyn* 6:55-62.

[104] *Rozenberg VL, Sobolev PO, Soloviev AA, Melnikova LA* (2005) The spherical block model: dynamics of the global system of tectonic plates and seismicity. *Pure Appl Geophys* 162(1): 145–164.

[105] *Мельникова Л.А., Розенберг В.Л.* (2007) Сферическая блоковая модель динамики литосферы и сейсмичность: различные модификации численные эксперименты //Труды Института математики и механики УрО РАН, Т. 13. №3. С.95–120.

[106] *Gripp AE, Gordon RG* (2002) Young tracks of hotspots and current plate velocities. *Geophys J Int* 150:321–361.

[107] *Rozenberg V* (2020) Block model of lithosphere dynamics: new calibration method and numerical experiments. In: Sokolinsky L, Zymbler M (eds) *Parallel Computational Technologies 2020, Communications in Computer and Information Science (CCIS) 1263*, Springer Nature Switzerland AG, pp 181–197.

[108] *Melnikova LA, Rozenberg VL* (2015) A stochastic modification of the spherical block-and-fault model of lithosphere dynamics and seismicity. *Computational Methods and Programming* 16:112-122.

[109] *Melnikova L, Mikhailov I, Rozenberg V* (2017) Simulation of global seismicity: New computing experiments with the use of scientific visualization software. In: Sokolinsky L, Zymbler M (eds) *Parallel Computational Technologies 2017, Communications in Computer and Information Science (CCIS) 753*, Springer International Publishing AG, pp 215–232.

А.И. Горшков

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

ВКЛАД А.А. СОЛОВЬЕВА В ПРОБЛЕМУ РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При расчете сейсмического риска для сейсмоактивного региона необходимо ответить на вопрос, где в рассматриваемом регионе могут произойти сильные землетрясения. Пионерский подход к решению этой задачи был сформулирован в работах (Гельфанд и др., 1972, 1973), где проблема определения мест возможного возникновения сильных землетрясений была сформулирована как задача распознавания образов. Этот подход начал разрабатываться коллективом геофизиков, математиков и геоморфологов в начале 70-х годов прошлого века под руководством В.И. Кейлис-Борока и И.М. Гельфанда. Формулировка проблемы прогноза мест возникновения сильных землетрясений как задачи распознавания образов основана на гипотезе, что эпицентры большинства сильных землетрясений приурочены к местам пересечений тектонически активных зон разломов - *морфоструктурным узлам*. Местоположение узлов определяется по специальной методике формализованного морфоструктурного районирования (Ранцман, 1979). Соответственно, методология включает два основных этапа: на первом этапе с помощью морфоструктурного районирования определяются объекты распознавания – морфоструктурные узлы; на втором - методами распознавания образов производится разделение всех узлов данного региона на высоко- и низкосейсмичные относительно выбранной пороговой магнитуды.

До начала 90-х годов прошлого века исследования, в основном, были сосредоточены в лаборатории прикладной математики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, которую возглавлял А.Д. Гвишиани

(в настоящее время – академик РАН). В дальнейшем эти работы были продолжены в ИТПЗ РАН под руководством А.А. Соловьева.

Александр Анатольевич начал заниматься исследованиями по РМСЗ фактически сразу с момента своего поступления в Отдел вычислительной геофизики ИФЗ АН СССР в декабре 1976 г. На следующий год в Отделе была создана лаборатория прикладной математики под руководством А.Д. Гвишиани, одним из направлений деятельности которой стали исследования по РМСЗ. На фотографии, сделанной в середине 80-х годов, запечатлена группа сотрудников лаборатории с французским сейсмологом А. Систернасом.



Стоят (слева направо): А.Д. Гвишиани, Е.Б. Дубровская, М.Б. Филимонов, А. Систернас, А.А. Соловьев. Сидит А.И. Горшков

Для понимания сути этих работ необходимо кратко напомнить основные положения методики РМСЗ.

Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений как задача распознавания образов

Задача определения мест возможного возникновения сильных землетрясений состоит в разделении территории рассматриваемого сейсмоактивного региона на две части: высокосейсмичные области, где возможны эпицентры сильных землетрясений, и низкосейсмичные области, где эпицентры таких землетрясений не возникают.

Процедура решения этой задачи состоит из следующих этапов:

- выделение региона и задание порога M_0 , определяющего сильные землетрясения;
- морфоструктурное районирование региона и формулировка задачи на языке распознавания образов;
- определение обучающей выборки для применения алгоритма распознавания образов;
- отбор характеристик, описывающих объекты распознавания, и измерение их значений;
- дискретизация и кодирование значений характеристик в виде компонент бинарных векторов;
- применение алгоритма распознавания образов с целью разделения объектов распознавания на два класса: «высокосейсмичные» объекты, вблизи которых возможны сильные землетрясения и «низкосейсмичные» объекты, вблизи которых не происходят сильные землетрясения;
- оценка достоверности полученной классификации путем контрольных тестов;
- интерпретация полученной классификации объектов распознавания в виде разделения рассматриваемого региона на высокосейсмичные и низкосейсмичные области;
- интерпретация полученного правила распознавания.

На первом этапе определяются границы региона, для которого будет решаться задача распознавания мест сильных землетрясений. Поскольку в результате решения задачи для всей территории региона должны быть определены единые критерии, отделяющие места возможного возникновения сильных землетрясений от мест, где такие землетрясения не ожидаются, то регион должен быть достаточно тектонически однородным. Это означает, что во всем регионе причины возникновения сильных землетрясений должны быть подобны.

Одновременно с определением региона задается порог M_0 . При этом принимаются во внимание следующие критерии: число известных сильных землетрясений в регионе не должно быть слишком мало (не менее 10-20), а окрестности их эпицентров, соразмерные с очагами, не должны покрывать слишком большую часть территории региона. Выполнение первого критерия создает возможность формирования достаточной обучающей выборки (примеров мест, где уже известны сильные землетрясения) для применения алгоритма распознавания образов. Выполнение второго критерия обеспечивает наличие в регионе областей, где сильные землетрясения не происходят, и, следовательно, задача не будет иметь тривиальное решение, когда сильные землетрясения возможны на всей территории региона. Таким образом, значение порога M_0 связано, как с уровнем сейсмической активности региона, так и с его размерами.

После выбора региона и магнитудного порога, определяющего сильные землетрясения, в регионе выделяются объекты распознавания. В работе (Гельфанд и др., 1972) в качестве объектов распознавания использовались морфоструктурные узлы – окрестности пересечений морфоструктурных линеаментов. Морфоструктурные линеаменты, являющиеся границами блоков земной коры, трассируются с помощью морфоструктурного районирования (МСР), которое основано на представлении о блоковой структуре земной коры. В результате МСР в регионе выделяются три

элемента блоковых структур: иерархически упорядоченные блоки; морфоструктурные линеаменты – границы блоков; морфоструктурные узлы – места сочленений блоков, где пересекаются линеаменты.

Сильные землетрясения наряду с другими экстремальными природными явлениями приурочены к узлам. Возможные отклонения могут быть объяснены ошибками как в регистрации места и силы землетрясений, так и в определении местоположения узлов. Приуроченность сильных землетрясений к морфоструктурным узлам позволяет сформулировать задачу определения мест возможного возникновения сильных землетрясений в виде задачи распознавания образов, в которой объектами распознавания являются узлы. Алгоритм распознавания образов применяется для разделения узлов на два класса: высокосейсмичные узлы (в дальнейшем - узлы **В**), в которых возможны эпицентры сильных землетрясений, и низкосейсмичные узлы (в дальнейшем - узлы **Н**), в которых такие землетрясения не происходят.

Использование алгоритмов распознавания с обучением требует предварительного формирования обучающей выборки W_0 , которая состоит из двух непересекающихся подмножеств: B_0 – объекты, априори принадлежащие классу **В**, и H_0 – объекты, априори принадлежащие классу **Н**. Формирование $W_0 = B_0 \cup H_0$ выполняется следующим образом. В случае использования узлов в качестве объектов распознавания в подмножество B_0 включаются узлы, которые содержат известные в регионе эпицентры сильных землетрясений. Подмножество H_0 формируется либо из оставшихся объектов W , $H_0 = W \setminus B_0$, либо из объектов, в которых отсутствуют эпицентры землетрясений с $M \geq M_0 - \delta$, где $\delta > 0$ и обычно имеет значение около 0.5. При этом необходимо подчеркнуть, что невозможно получить подмножество H_0 , являющееся «чистым» материалом обучения класса **Н**. В некоторых из этих объектов возможны землетрясения с $M \geq M_0$, которые не известны в силу малой продолжительности периода наблюдений. Задача распознавания и состоит в нахождении таких объектов.

Важным вкладом в развитие РМСЗ стала разработка А.А. Соловьевым статистического метода для оценки приуроченности эпицентров к пересечениям линеаментов был разработан (Гвишиани и Соловьев, 1981), применение которого особенно целесообразно в ситуации, когда сеть линеаментов достаточно густая и связь землетрясений с их пересечениями неочевидна. Суть метода заключается в следующем: пусть в регионе известно N землетрясений с $M \geq M_0$; $N(\rho)$ обозначает количество эпицентров, для которых расстояние до ближайших пересечений линеаментов не превышает ρ , а функция $p(\rho) = N(\rho)/N$ определяет эмпирическое расстояние до ближайшего пересечения. Затем строится «случайная система пересечений», которая получается из системы реальных пересечений путем генерации для каждого реального пересечения нового «случайного» положения внутри круга радиусом R с центром в точке реального пересечения. Радиус R не должен быть слишком большим, с тем чтобы площадь кругов не превышала площадь региона. Для всех случайных систем определяется функция $p(\rho)$ и рассчитывается ее среднее значение $\overline{p(\rho)}$. Если $p(\rho)$ намного больше, чем $\overline{p(\rho)}$ для достаточно большого интервала значений ρ , то корреляция эпицентров с пересечениями устойчива, и реальные пересечения морфоструктурных линеаментов могут рассматриваться как объекты распознавания в данном регионе.

В начале 80-ых годов А.А. Соловьев решал задачи РМСЗ для протяженных и высокосейсмичных сегментов Тихоокеанского пояса - горного пояса Анд Южной Америки и Камчатки (Гвишиани и др., 1984; Гвишиани и Соловьев, 1981; Gvishiani and Soloviev, 1984). На Рис. 1 представлены результаты распознавания высокосейсмичных пересечений линеаментов в горном поясе Анд для $M7.75+$. Впоследствии в этом регионе произошло 5 землетрясений с $M7.75+$, четыре из которых возникли в высокосейсмичных пересечениях линеаментов, ранее распознанных в работах А.А. Соловьева.

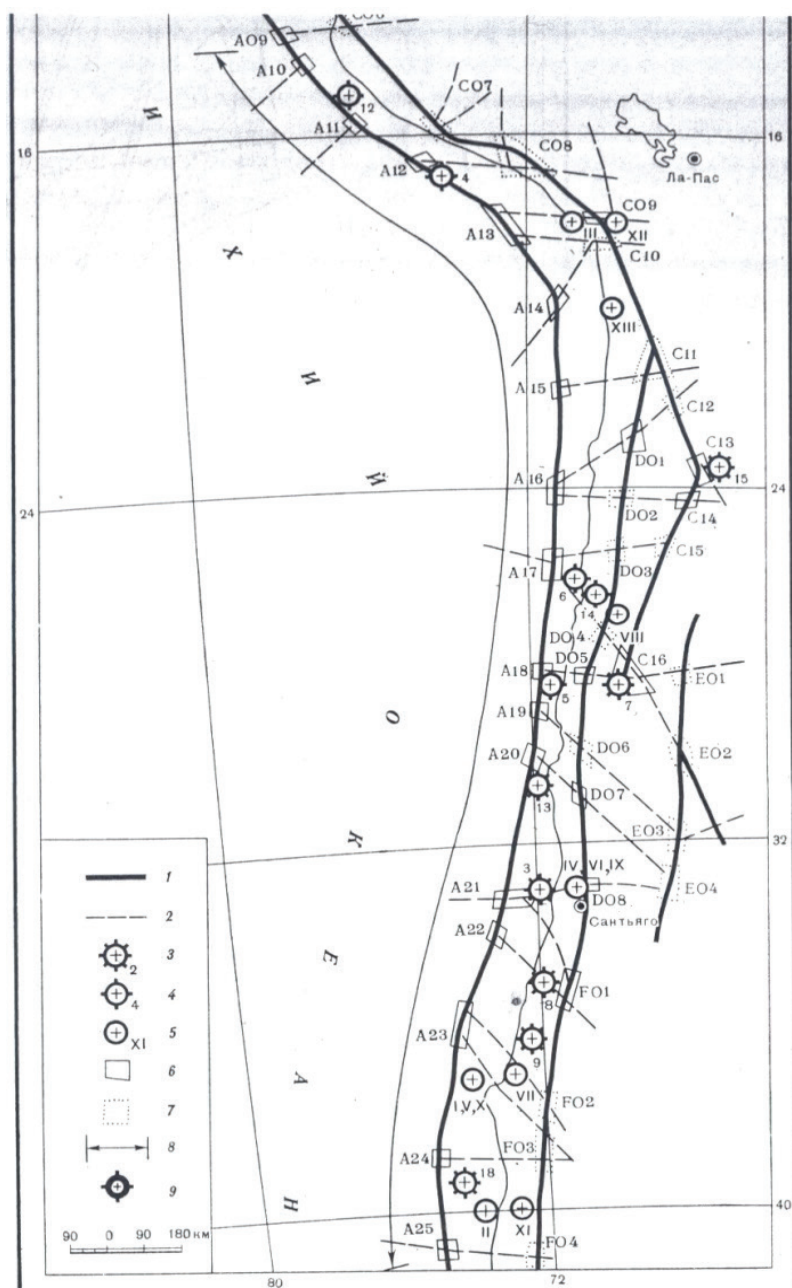


Рис. 1. Распознанные высокосейсмичные пересечения в Андах Южной Америки для M7.75+ по (Гвишиани и др., 1984; Gvishiani and Soloviev, 1984).

Линиями показаны линеаменты высоких рангов. Распознанные **В**-пересечения линеаментов обведены прямоугольниками. Кружки - эпицентры землетрясений с M7,5+.

Новизна этой работы заключалась в том, что впервые на основе морфоструктурных данных была показана возможность применения алгоритма распознавания для выявления возможных мест сильнейших землетрясений.

В середине 80-ых годов в рамках межакадемического сотрудничества проводились советско-французские исследования по распознаванию

высокосейсмичных зон в Западных Альпах, Пиренеях и на Кавказе (Вебер и др., 1985, 186; Гвишиани и др., 1984, 1986, 1987, 1988; Cisternas et al., 1985). В этих работах впервые в качестве "сильных землетрясений" были рассмотрены события с $M5+$. На Рис. 2 показан результат распознавания высокосейсмичных пересечений для $M5+$ в Западных Альпах. В этих исследованиях критерии сейсмичности, определенные в каждом из трех регионов, использовались затем для выделения сейсмоопасных пересечений в каждом другом регионе. Результаты перекрестного переноса критериев в этих трех регионах свидетельствуют о качественном подобии критериев высокой сейсмичности в этих регионах. Фактор отмеченного подобия следует принимать во внимание в исследованиях по моделированию сейсмического процесса.

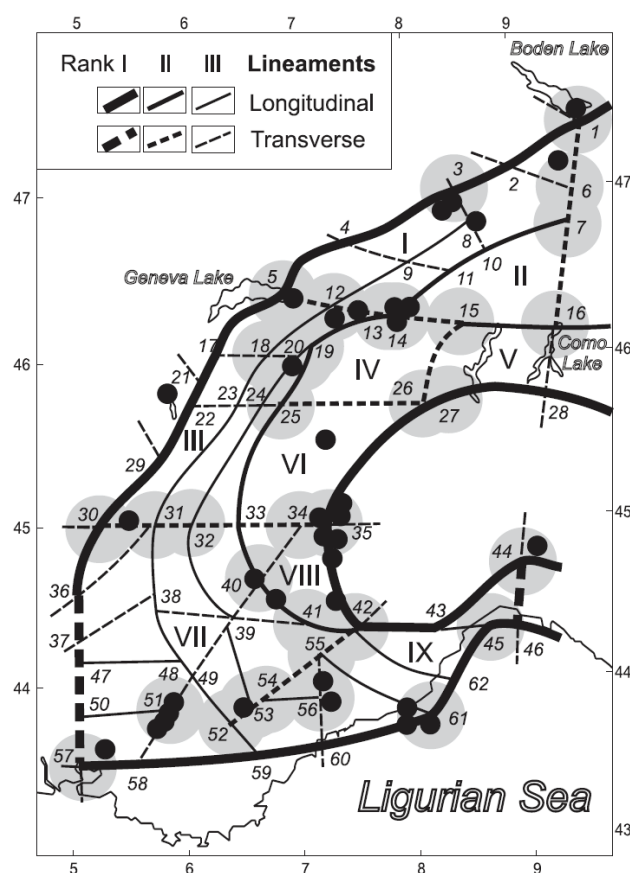


Рис. 2. Результат распознавания сейсмоопасных пересечений для $M5+$ (по Cisternas et al., 1985).

Серые круги - распознанные сейсмоопасные пересечения для $M5+$. Линии – линеаменты разных рангов. Черные кружки – эпицентры землетрясений с $M5+$.



Монография А.Д. Гвишиани, А.И. Горшков, Е.Я. Ранцман, А. Систернас, А.А. Соловьев "Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности".

Результаты исследований по проекту Пиренеи - Западные Альпы - Кавказ были суммированы в монографии А.Д. Гвишиани, А.И. Горшков, Е.Я. Ранцман, А. Систернас, А.А. Соловьев "Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности", изданной в 1988 г.

Впоследствии крупный проект по РМСЗ был реализован в рамках группы по строению и нелинейной динамике Земли (STRUCTURE AND NON-LINEAR DYNAMICS OF THE EARTH (*SAND Group*)) при Международном центре теоретической физики им. Абдуса Салама в г. Триесте, Италия. Исследования *SAND* группы по проблеме РМСЗ были сфокусированы на изучении Средиземноморского сейсмоактивного пояса. Были решены задачи распознавания для Карпат (Gorshkov et al., 2000), Апеннин и Сицилии (Gorshkov et al., 2002), Альп и Динарид (Gorshkov et al., 2002; Горшков и Соловьев, 2009), Иберийского полуострова (Gorshkov et al., 2010), впадины По (Peresan et al., 2014), Корсики и Сардинии (Gorshkov et al., 2021).

Нетривиальным стало решение задачи РМСЗ для Иберийского полуострова, который характеризуется крайне неоднородным тектоническим строением. В пределах полуострова альпийские сейсмоактивные горные системы Пиренеев и Бетики сочетаются с областями древнего герцинского фундамента. Соответственно, сейсмогенез молодых горных стран и герцинской платформы обуславливается разными причинами. Поэтому

задача распознавания была решена отдельно для каждого из горных поясов Пиренеев и Бетики и областей герцинского фундамента.

На Рис. 3 представлена сводная карта результатов распознавания в Итальянском регионе.

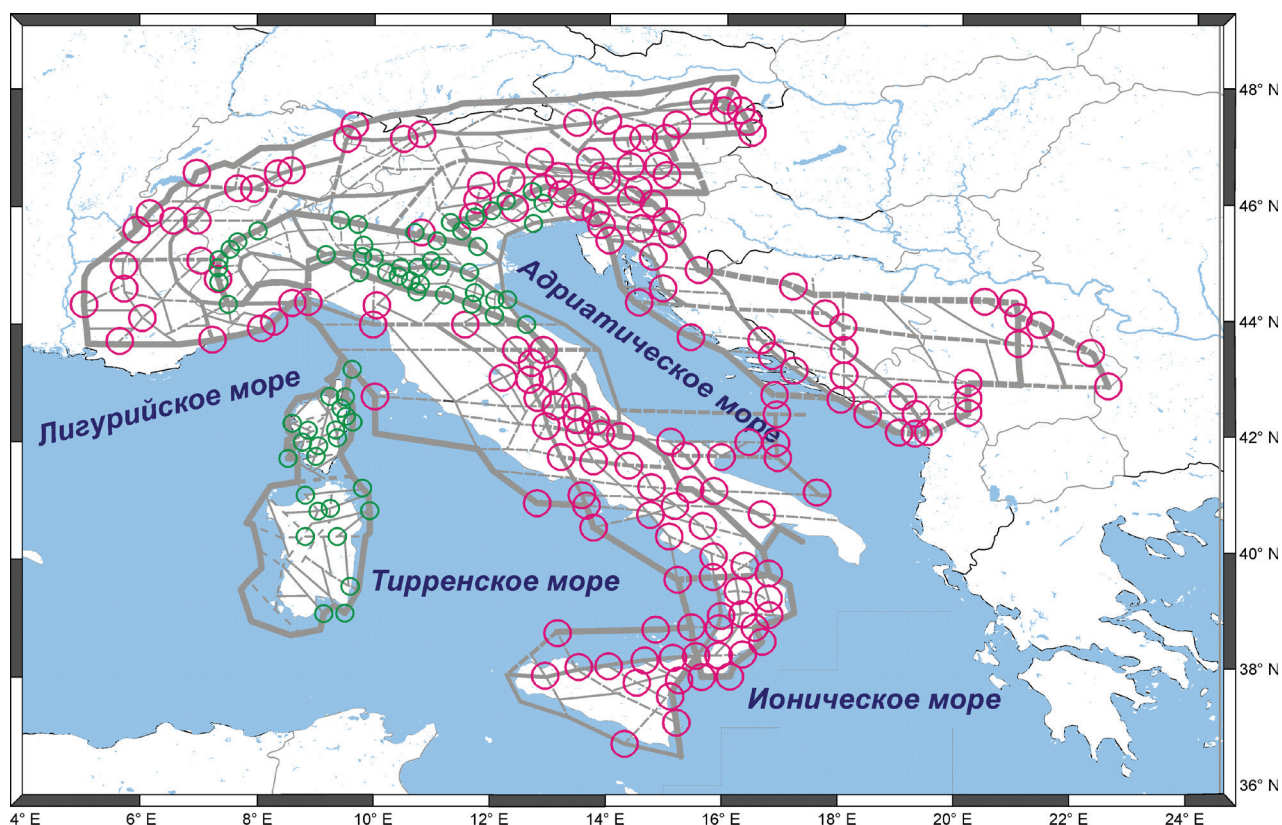


Рис. 3. Результаты распознавания сейсмоопасных узлов в Итальянском регионе.

Красные круги маркируют узлы, распознанные как сейсмоопасные для $M6+$. Зелеными кругами показаны узлы, в которых возможны землетрясения $M5+$.

В последних работах Александра Анатольевича по проблеме РМСЗ предпринята успешная попытка расширить набор геофизических параметров, которые используются для идентификации мест сильных землетрясений. Алгоритмы распознавания применяются к векторам, компоненты которых являются значениями параметров, характеризующих различные свойства классифицируемых объектов. Землетрясения происходят в зонах разломов в тектонически активных областях. В задачах распознавания мест сильных землетрясений параметры объектов должны характеризовать те свойства местоположения объекта, которые прямо или косвенно отражают различные

факторы, обуславливающие сейсмогенез. Поэтому естественно использовать параметры, которые тем или иным образом отражают интенсивность тектонических движений. В задачах РМСЗ эти характеристики должны отражать те свойства объекта, которые прямо или косвенно связаны с различными факторами, обуславливающими возможность возникновения землетрясений. Среди этих факторов главную роль играет интенсивность тектонических движений. В ходе многолетних работ по РМСЗ сформировался набор характеристик для описания объектов распознавания, который включает морфометрические показатели рельефа земной поверхности, особенности геометрии сети линеаментов и гравиметрические показатели. В работах А.А. Соловьева по Кавказу, Крыму и Алтай-Саянскому региону был протестирован новый параметр - литосферные магнитные аномалии (Соловьев и др., 2016; Горшков и др., 2017; Горшков и Соловьев, 2018).

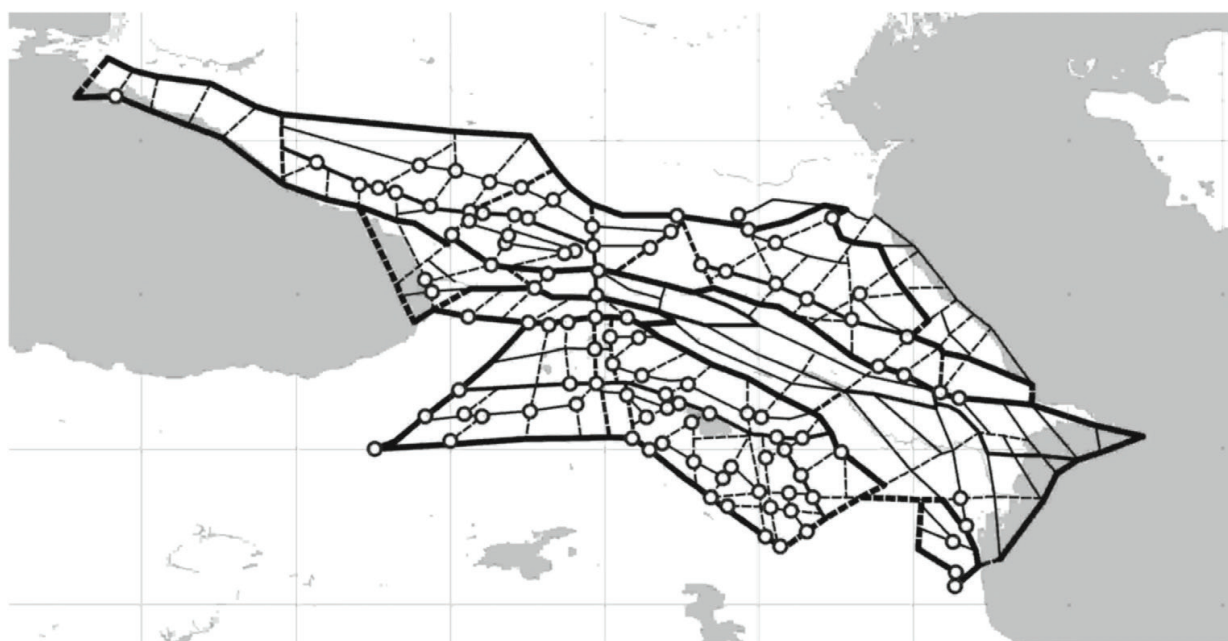


Рис. 4. Кавказ: пересечения линеаментов, отнесенные к классу **В** с использованием геомагнитных характеристик (Соловьев и др., 2016).

Толщина линий соответствует рангу линеаментов: толстые – первый ранг; средние – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные. Кругами отмечены пресечения, отнесенные к классу **В**.

На Рис. 4 показан результат распознавания высокосейсмичных пересечений линеаментов для Кавказа. Это исследование показало, что данные по литосферным магнитным аномалиям являются информативными с точки зрения определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, и дало аргументы в пользу их использования при решении аналогичных задач в других сейсмоактивных регионах мира.

Мониторинг результатов распознавания мест сильных землетрясений

В ходе решения задач распознавания особое внимание всегда уделялось контролю качества получаемых результатов. Устойчивость получаемых классификаций к вариациям материала обучения и параметров объектов распознавания проверялась с помощью специальных контрольных экспериментов (Гвишиани и др., 1988; Gorshkov et al., 2003). При наличии соответствующей информации распознанные высокосейсмичные узлы сопоставлялись с данными о сильных исторических событиях и палеоземлетрясениях. Однако совершенно очевидно, что единственно объективным критерием качества результатов распознавания в данном регионе могут служить только последующие землетрясения, и никакая ретроспективная эвристическая оценка не может заменить этот окончательный тест результатов распознавания.

А.А. Соловьев всегда уделял большое значение мониторингу результатов распознавания и инициировал его проведение. В этом разделе представлены результаты такого мониторинга, проведенного в 2014 г. (Соловьев и др., 2014). Для проведения мониторинга рассматривался глобальный каталог землетрясений мировой сети станций, составленный в Национальном центре информации о землетрясениях (NEIC). Землетрясение учитывалось в мониторинге, если хотя бы одно из значений четырех магнитуд (M_b , M_s , M_l , M_p), представленных для него в каталоге, было равным или превышало порог M_0 , который рассматривался в данном регионе. Регионы и значения M_0 для каждого из них указаны в табл. 1.

Таблица 1. Сводные результаты проверки достоверности прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений Соловьев и др., 2014).

Регион и год завершения исследования	M_0	Радиус окрестности пересечения r , км	Число сильных землетрясений в регионе после получения результата прогноза			
			общее число	в области В (в том числе в области В*)	в области Н	в области Н (вне окрестностей пересечений)
Тянь-Шань и Памир, 1972	6,5	40	7	6 (1)	0	1
Балканы, Малая Азия, Закавказье, 1974	6,5	40	27	25 (7)	1	1
Калифорния и Невада, 1976	6,5	25	14	13 (4)	0	1
Италия, 1979	6,0	35	8	4 (1)	0	4
Анды Южной Америки, 1982	7,75	75	5	4 (2)	1	0
Камчатка, 1984	7,75	75	1	1	0	0
Западные Альпы, 1985	5,0	25	6	5 (1)	1	0
Пиренеи, 1987	5,0	25	6	5 (1)	1	0
Большой Кавказ, 1988	5,0	25	13	13 (9)	0	0
Гималаи, 1992	6,5	50	4	3 (1)	0	1
Всего			91	79 (27)	4	8

Примечание: В* узлы В, где до решения задачи не было известно эпицентров сильных землетрясений

В Таблице 1 приведены сводные результаты проверки достоверности прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений с использованием пересечений морфоструктурных линеаментов в качестве объектов распознавания. Всего в рассмотренных регионах после получения результата распознавания высокосейсмичных областей произошло 91 сильное землетрясение. Эпицентры 79 из них (87%) расположены в высокосейсмичных областях. При этом 27 эпицентров находятся в окрестностях пересечений, отнесенных к классу **В**, где ранее не было сильных землетрясений. Мониторинг дает аргументы в пользу достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

Данная точность прогноза мест землетрясений адекватна характеру используемых данных и достаточна для использования результатов распознавания в работах по сейсмическому районированию и оценке сейсмоопасности для ответственных объектов экономической инфраструктуры (АЭС, химические предприятия, магистральные трубопроводы и т.п.).

Распознавание рудоносных узлов

В ходе исследований по распознаванию мест сильных землетрясений на основе данных морфоструктурного районирования была замечена связь рудных месторождений эндогенного происхождения с узлами пересечения линеаментов, в том числе, и с высокосейсмичными узлами (Гвишиани и др., 1988). Основываясь на современных электронных базах данных о месторождениях мира, под руководством А.А. Соловьева была предпринята попытка на новом качественном уровне исследовать корреляцию рудных месторождений с морфоструктурными узлами и с помощью алгоритмов распознавания образов выявить потенциально рудоносные узлы. Такие

исследования были проведены в рамках программы ОНЗ РАН №2 «Генетические особенности и условия формирования крупных и суперкрупных месторождений стратегических видов минерального сырья и проблемы их комплексного использования», которой руководил академик Д.В. Рундквист (Горшков и Соловьев, 2004, 2006).

В частности, была решена задача распознавания потенциально рудоносных узлов в пределах Средиземноморского региона и Кавказа (Рис. 5). Она состояла в нахождении характерных признаков, отличающих узлы, в которых расположены крупные и суперкрупные месторождения, от узлов, вмещающих только мелкие и средние месторождения. Обучение алгоритма Кора-3 составили две группы узлов Средиземноморья и Кавказа. Первая группа включала 20 узлов, вмещающих крупные и сверхкрупные месторождения. Вторая состояла из 86 узлов, в которых расположены мелкие и средние месторождения металлов. В результате распознавания все 20 узлов, вмещающих крупноразмерные месторождения, были классифицированы как рудоносные. Признакам узлов с крупными и суперкрупными месторождениями отвечают шесть узлов из второй группы материала обучения, в которых известны только более мелкие месторождения. На Рис. 5 эти узлы отмечены красными кругами. Четыре таких узла расположены на западе Иберийского полуострова в пределах герцинского фундамента. Они связаны с линеаментами второго ранга и находятся в районе, где известны три крупных месторождения (№ 2, 3 и 9 на Рис. 5). Один узел распознан в Альпах на линеаменте первого ранга, который отделяет горное сооружение от равнинных территорий молодой Паданской впадины. И один узел распознается на Большом Кавказе. Он расположен на продольном линеаменте второго ранга, который соответствует разломной зоне Главного Кавказского надвига.

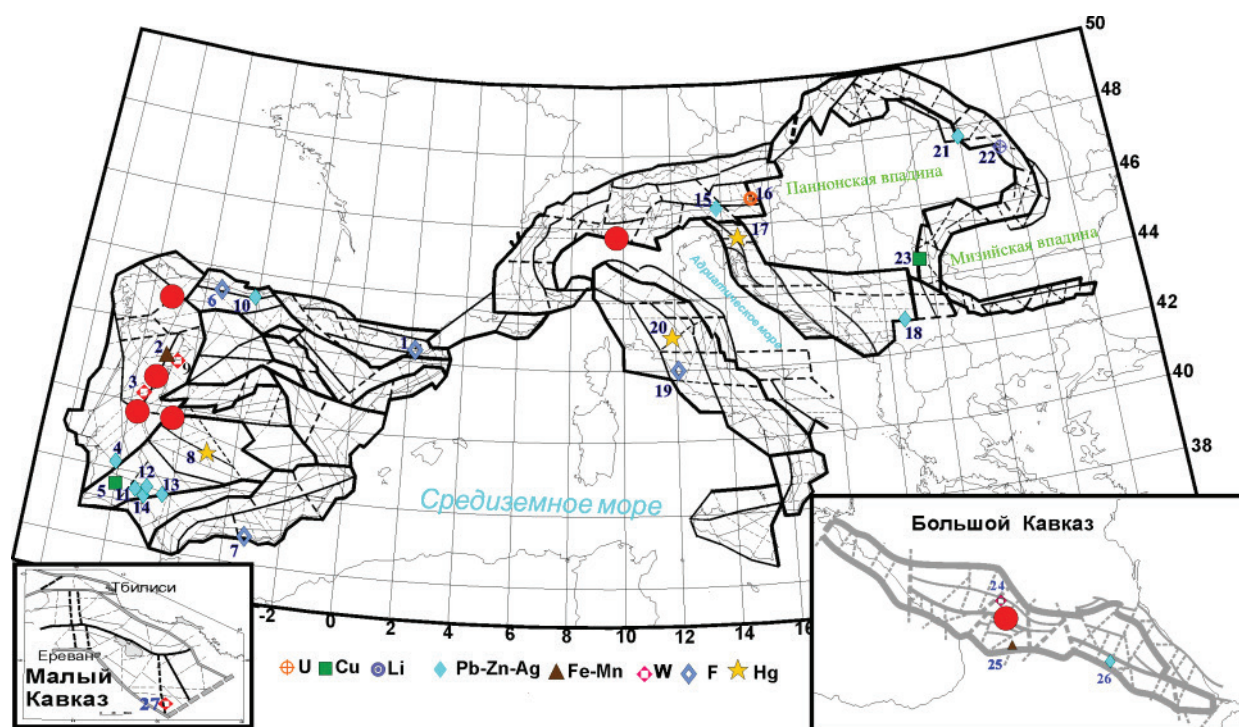


Рис. 5. Распознавание крупных и сверхкрупных месторождений металлов в Средиземноморском сегменте Альпийского пояса по (Горшков и Соловьев, 2006).

Красные круги – распознанные места возможной локализации крупных и сверхкрупных месторождений металлов.

Согласно результатам распознавания, узлы Средиземноморья и Кавказа, которые вмещают крупные и суперкрупные месторождения металлов, характеризуется сочетанием следующих признаков:

- пониженное гипсометрическое положение узла,
- наличие в узле линеамента высшего (первого) ранга или близость узла к линеamentу второго ранга,
- высокий градиент рельефа земной поверхности в пределах узла,
- наличие глубинных плотностных неоднородностей в пределах узла.

Совокупность этих признаков (критерии рудоносности) свидетельствует, что суперкрупные и крупные месторождения металлов локализованы в узлах, занимающих пониженное гипсометрическое, которые характеризуются повышенной раздробленностью и подвижностью земной коры. Пониженное гипсометрическое положение узлов, контролирующих крупноразмерные месторождения, является основным признаком, который

отличает их от узлов, вмещающих мелкие и средние месторождения. Критерии рудоносности Средиземноморья и Кавказа представлены конкретными интервалами численных значений геоморфологических и гравиметрических параметров и могут применяться для идентификации рудоносных узлов в других мезо-кайнозойских горно-складчатых поясах. Предложенная в работах (Соловьев и Горшков, 2004, 2006) методика позволяет достаточно быстро и с небольшими затратами выявлять потенциально рудоносные узлы на региональном уровне, что может эффективно использоваться при планировании практических прогнозных металлогенических исследований.

В настоящее время исследования по распознаванию как сейсмоопасных, так и рудоносных узлов, в которые А.А. Соловьев внес огромный вклад, продолжают активно развиваться в лаборатории геодинамики и математических методов изучения геосистем ИТПЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ламбер С., Раницман Е.Я., Саллантен Ж., Сальдано А., Систernas А., Соловьев А.А. Распознавание мествозможного возникновения сильных землетрясений. XII. Два подхода к прогнозу мествозможного возникновения сильных землетрясений в Западных Альпах // Теория и анализ сейсмологической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.:Наука, 1985. С. 139-154. (Вычисл. сейсмология; Вып. 18).

Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Ламбер Ж., Соловьев А.А., Трусков А.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIII. Неотектоническая схема Западных Альп. $M > 5,0$ // Математические методы в сейсмологии и геодинамике / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1986. С. 82-94. (Вычисл.сейсмология; Вып. 19).

Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности. Докл. АН СССР, Сер.геофиз., 1972, 202, № 6. С.28-35.

Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Изв.АН СССР. Физика Земли, 1984. № 1. С.20-23.

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. О приуроченности эпицентров сильных землетрясений кпересечениям морфоструктурных линеаментов на территории Южной Америки // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1981. С. 46-50 (Вычисл. сейсмология; Вып. 13).14.

Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. X. Места землетрясений магнитуды $M > 7,75$ на Тихоокеанском побережье Южной Америки. Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1982. С. 56-67(Вычисл. сейсмология; Вып. 14).

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. К решению задачи прогноза мест возникновения сильных землетрясений на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. №1. С. 86-87.

Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Известия АН СССР. Физика Земли. 1984. №1. С. 20-33.

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Саллантен Ж., Сальдано А., Систернас А. Результаты советско-французских исследований по распознаванию высокосейсмичных зон в Западных Альпах // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. № 6. С.1353-1358.

Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Ламбер Ж., Соловьев А.А., Трусков А.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIII. Неотектоническая схема Западных Альп. $M > 5,0$ // Математические методы в сейсмологии и геодинамике / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1986. С. 82-94. (Вычисл. сейсмология; Вып. 19).

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Систернас А., Филип Э. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIV. Пиренеи и Альпы // Численное моделирование и анализ геофизических процессов. М.: Наука, 1987. С.123-135. (Вычисл. сейсмология; Вып. 20).

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 174с.

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзедобов Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли, 2020, №1, С.5-29.

Горшков А.И., Кособоков В.Г., Раницман Е.Я., Соловьев А.А. Проверка результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений с 1972 по 2000 год // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. М.: ГЕОС. 2001. С.48-57 (Вычислительная сейсмология; Вып.32).

Горишков А.И., Соловьев А.А. Определение характеристик рудоносных узлов методами распознавания образов. В сб.: Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования /Под. Ред. Д.В.Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С.381-390.

Горишков А.И., Соловьев А.А. Распознавание облика рудных месторождений в поясе Тетис. В кн.: Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В трех томах. Том.1. Глобальные закономерности размещения (ред. Д.В.Рундквист). М.: ИГЕМ РАН, 2006. С.361-374.

Горишков А.И., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений $M \geq 6,0$ в горных поясах Средиземноморья // *Вулканология и сейсмология*, № 3, 2009. С. 71-80.

Горишков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // *Вулканология и сейсмология*, 2017, № 6, с. 21–27 DOI: 10.7868/S0203030617060025.

Горишков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // *Доклады РАН* 2018, том 479, № 3, с. 333–335 DOI: 10.7868/S0869565218090219.

Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Анализ расположения эпицентров землетрясений с $M \geq 5,5$ относительно пересечений морфоструктурных линеаментов востока Средней Азии // *Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений*. М.: Наука, 1982. С.74-76. (Вычисл. сейсмология; Вып. 14).

Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности. *Чебышевский сборник*. 2018;19(4):55-90. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90>.

Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 170с.

Соловьев А.А., Новикова О.В., Горшков А. И., Пиотровская Е.П. (2013) Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // Доклады академии наук, 2013, том 450, № 5, с. 599-601. DOI: 10.7868/S0869565213170222.

Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. (2014) Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Изв. РАН, сер. Физика Земли, №2, С.161-178.

Соловьев Ал.А., Горшков А.И., Соловьев Ан.А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Изв. РАН, сер. Физика Земли. 2016. № 6. С. 21-27.

Caputo M., Keilis-Borok V., Oficerova E., Ranzman E., Rotwain I., Solovieff A. (1980). Pattern recognition of earthquake-prone areas in Italy. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 21, 305-320.

Cisternas A., Godefroy P., Gvishiani A., Gorshkov A., Kossobokov V., Lambert M., Rantsman E., Sallantin J., Saldano H., Soloviev A., and Weber C. A dual approach to recognition of earthquake prone areas in the Western Alps. *Annale Geophysicae*, 1985. 3, 2, 249-270.

Gorshkov A., Kuznetsov I., Panza G., and Soloviev A. (2000). Identification of future earthquake sources in the Carpatho-Balkan orogenic belt using morphostructural criteria. *PAGEOPH*, 157, 79-95.

Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. (2002). Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily, *JSEE*: Spring 2002, Vol.4, No.1, 1-24.

Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A. (2003). Recognition of earthquake-prone areas. In: (Eds: Keilis-Borok V., Soloviev A.) *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer, Heidelberg, 239-310.

Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. (2003). Recognition of the strong earthquake-prone areas ($M > 6.0$) within the mountain belts of Central-Europe. *Revue Roumaine de Geophysique*, Tome 47, pp.30-41.

Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. (2004). Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides. *Bolletino della Societa Geologica Italiana*, 123, 3-18.

Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A., Peresan A. (2009). Delineation of the geometry of the nodes in the Alps-Dinarides hinge zone and recognition of seismogenic nodes ($M \geq 6.0$). *Terra Nova*, 21(4), 257-264. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00879.x.

Gorshkov, A.I., A.A. Soloviev, M.J. Jiménez, M. García-Fernández, and G.F. Panza Recognition of earthquake-prone areas ($M \geq 5.0$) in the Iberian Peninsula. *Rendiconti Lincei*, 2010, 21, 2: 131-162.

Gorshkov A., and Soloviev A. (2021). Morphostructural zoning for identifying earthquake-prone areas. In: Earthquakes and sustainable infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) approach guarantees prevention rather than cure. (Eds Panza, G.F., Kossobokov, V.G., Laor, E., De Vivo, B.) Elsevier, 135-149. ISBN: 978-0-12-823503-4.

Gorshkov, A., Panza, G.F., Soloviev, A. et al. On the seismic potential of the Corsica–Sardinia block. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 32, 715–728 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12210-021-01014-z>.

Gvishiani, A.D., and A.A. Soloviev Recognition of places on the Pacific coast of the South America where strong earthquakes may occur. *Earthq. Predict. Res.*, 1984, 2: 237-243.

Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., and Panza G.F. (2015). The contribution of pattern recognition of seismic and morphostructural data to seismic hazard assessment. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* Vol. 56, n. 2, pp. 295-328; June 2015 DOI 10.4430/bgta0141.

В.И. Бердышев, А.Г. Ченцов, В.В. Васин, А.Л. Агеев, А.И. Короткий,
И.А. Цепелев, В.И. Максимов, Б.В. Дигас, В.Б. Костоусов,
И.Н. Кандоба, В.Л. Розенберг

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН

О СОТРУДНИЧЕСТВЕ УЧЕНЫХ ИНСТИТУТА ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ РАН И ИНСТИТУТА МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ИМ. Н.Н.КРАСОВСКОГО УРО РАН

Сотрудничество ученых Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН, г. Москва) и Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН (ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург) началось в 90-х годах прошлого века с совместной работы по проектам Международного Научно-Технического Центра (МНТЦ). В то время директором ИТПЗ РАН был академик РАН В.И. Кейлис-Борок, неизменным координатором программы сотрудничества (а затем и директором Института) – член-корр. РАН А.А. Соловьев, директором ИММ УрО РАН был академик РАН А.Ф. Сидоров, с 2000-го года – академик РАН В.И. Бердышев, руководителем работ от ИММ – д.ф.-м.н. В.Л. Гасилов.



Участники совместных проектов со стороны ИММ УрО РАН
с академиком Ю.С. Осиповым (февраль 1999 г.). Слева направо: Костоусов В.Б.,
Кукушкин А.П., Мельникова Л.А., Осипов Ю.С., Думшева Т.Д., Кандоба И.Н.,
Цепелев И.А., Короткий А.И.

При подготовке издания, посвященного памяти Александра Анатольевича Соловьева, участники совместных исследований со стороны ИММ УрО РАН поделились своими воспоминаниями о тех временах, о сотрудничестве с коллегами из ИТПЗ РАН и рассказали о совместно решенных задачах. В то время ИТПЗ РАН назывался Международным институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (МИТПАН).

Академик РАН Виталий Иванович Бердышев (директор ИММ им. Н.Н. Красовского УрО РАН в 2000–2015 гг.)

О существовании МНТЦ наш Институт узнал в 1992 г. от Юрия Сергеевича Осипова, Президента РАН, бывшего директора ИММ УрО РАН. Он, по-видимому, не сразу, а после некоторых колебаний, сообщил нам, что эта организация готова платить западные деньги тем, кто оборонную тематику заменит на «мирные» задачи, например, на задачи прогноза и моделирования землетрясений. Он, конечно, был уверен в нашем патриотизме, но добавку-то к мизерной зарплате начала 90-х обещали немалую, в долларах, да еще оплачиваемые по европейским стандартам зарубежные командировки. В итоге и вся оборонная тематика в ИММ продолжала успешно развиваться; и с Международным институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (Институтом В.И. Кейлис-Борока) был заключен договор, а с одним из руководителей этого Института Александром Анатольевичем Соловьевым и его коллегами был установлен тесный научный контакт. Александр Анатольевич сразу располагал к себе собеседника как очень спокойный, очень вежливый, глубоко порядочный человек и ученый высокого класса. В своих лекциях на международных семинарах в г. Триесте ему удавалось убедить слушателей в том, что актуальнейшая проблема предсказания природных катастроф не является безнадежной, она включает в себя огромное количество задач из математики, физики и других областей науки. Он излагал целый арсенал средств и примеров, когда в определенных условиях возможно получить частичное решение. Мне удалось дважды участвовать в работе этого

семинара в составе уральской делегации. Принимали участие в семинаре и другие работники ИММ, причем как в качестве слушателей, так и лекторов, тем самым внося дополнительный вклад в важную и интересную тематику.

Таким образом, финансы МНТЦ, изначально направленные на «нейтрализацию» российских разработчиков оружия, использовались на материальную поддержку наших специалистов и способствовали плодотворному сотрудничеству ИММ с научной школой В.И. Кейлис-Борока и его последователя А.А. Соловьева.

Член-корреспондент РАН Александр Георгиевич Ченцов

В перестроечный и постперестроечный периоды времени в составе большой команды сотрудников нашего института мне довелось участвовать в работах, связанных с прогнозированием и моделированием землетрясений и выполняемых совместно с МИТПАН. Научное руководство этими исследованиями осуществлял А.А. Соловьев (в нашем институте работами руководил В.Л. Гасилов). Хочу отметить прекрасную организацию работ, широкий спектр исследований. Все это, конечно, в определяющей степени было связано с деятельностью А.А. Соловьева. Наряду с весьма конкретными геофизическими моделями в этих исследованиях были представлены теоретические направления, связанные, в частности, с обработкой статистической информации. Я принимал участие в одном из таких исследований, основанном на конструкциях теории статистических решений. Мы обсуждали различные научные вопросы с Георгием Моисеевичем Молчаном; в частности, вопросы, связанные с мероприятиями по страхованию сооружений и предприятий в сейсмоопасных районах. Помню интересную дискуссию об игровых постановках теории статистических решений (статистические игры А. Вальда), которая (на мой взгляд) была полезной и для Г.М. Молчана, и для меня. Эти обсуждения послужили основой для теоретических конструкций при решении вероятностных задач весьма общей природы, которые сформировались при активном участии А.В. Кряжмского и касались как вопросов прогнозирования землетрясений,

так и общих постановок в теории природных случайных процессов, которые позднее были рассмотрены А.В. Кряжимским. Считаю, что А.А. Соловьеву удалось организовать интереснейшие исследования, охватывающие широкий круг вопросов, связанных с прогнозированием землетрясений и, вместе с тем, имеющих теоретическое значение и применение в других задачах прикладной математики.

Позднее мы не раз встречались с А.А. Соловьевым на Общих собраниях РАН. Он всякий раз проявлял доброжелательность, с интересом вспоминал о совместных работах. События, происходящие в РАН (реформа), его затрагивали и как ученого, и как директора; он неизменно был в курсе происходящего и болел душой за Академию. Безусловно, светлая память об Александре Анатольевиче Соловьеве сохранится у всех, кто с ним работал.

***Член-корреспондент РАН Владимир Васильевич Васин,
д.ф.-м.н. Александр Леонидович Агеев***

Мы расскажем об одной задаче, которая успешно решалась в рамках большой программы научного сотрудничества ИММ УрО РАН и МИТПАН, в том числе в 1994–1997 гг. и в 1999–2002 гг. во время совместной работы по грантам МНТЦ. Координатором программы сотрудничества неизменно выступал А.А. Соловьев.

Речь пойдет о решении проблемы волноводов при радиозондировании ионосферы. От ИММ в группу исполнителей входили В.В. Васин и А.Л. Агеев, а от МИТПАН – В.М. Маркушевич и Е.Н. Бессонова (на некоторых этапах в исследованиях участвовали И.В. Савин, С.Г. Киселев и Т.В. Антонова). Как известно, в атмосфере Земли на высоте около ста километров и выше расположен слой ионизированного газа, называемый ионосферой. Радиоволны короткого диапазона практически не взаимодействуют с неионизированной атмосферой и с тяжелыми положительными ионами, а с легкими электронами в ионосфере наблюдается сильное взаимодействие. Это приводит к тому, что радиоволны отражаются от ионосферы и возвращаются назад на Землю. В модели слоистой

ионосферы это позволяет ставить и решать обратную задачу радиозондирования по определению концентрации электронов $n(h)$ в зависимости от высоты h по результатам прохождения радиоволн. Стандартным является вертикальное радиозондирование со сканированием по частоте радиоизлучения. К сожалению, при использовании этого давно разработанного метода возникает проблема волноводов (долин). Пока $n(h)$ монотонно возрастает, концентрация электронов определяется однозначно и достаточно надежно. Участок по высоте с нарушением монотонного возрастания $n(h)$ называется волноводом, и однозначно определить $n(h)$ на этом участке невозможно. Более того, без дополнительной информации невозможно определение $n(h)$ для высот выше волновода. Известно, что реальная ионосфера имеет хотя бы один волновод (иногда два), что делает невозможным определение электронной концентрации во всем диапазоне высот только по данным радиозондирования. В.М. Маркушевич обратил внимание на наличие в ионосфере известной зависимости коэффициента преломления от частоты радиоизлучения (закон Эпплтона–Хартра). На этой основе он предложил схему горизонтального зондирования ионосферы на двух частотах и вывел интегральное уравнение Фредгольма–Стилтьеса первого рода (Бессонова и др., 1997) для связи так называемой «меры волновода» с экспериментально определяемыми из радиозондирования данными. Знание этой меры позволяет определять концентрацию электронов $n(h)$ для высот выше волновода. Таким образом, эта методика в каком-то смысле позволяет решить проблему волноводов при зондировании ионосферы. Однако, это было сделано только для частного случая, когда направление магнитного поля Земли ортогонально плоскости радиозондирования. Практически это означает, что радиозондирование следует проводить на экваторе Земли и вдоль экватора. Реализация этой программы требует решения уравнения Фредгольма–Стилтьеса первого рода, которое, как известно, является некорректно поставленной нетривиальной задачей. В ИММ существует школа решения некорректно поставленных задач, идущая от выдающегося российского ученого В.К. Иванова. Группа

под руководством В.В. Васина к этому времени имела большой практический опыт решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода. Кроме этого, конечно, было желательно снять условие ортогональности направления магнитного поля плоскости радиозондирования.

В рамках программы был выполнен большой цикл исследований нетривиальной (как в теоретическом, так и прикладном аспектах) задачи решения уравнения Фредгольма–Стилтьеса (Бессонова и др., 1997; Агеев и др., 1998). В частности, установлена неединственность решения этого уравнения в общем случае, найдена дополнительная априорная информация, позволяющая восстановить единственность, и разработаны надежные регуляризующие алгоритмы, позволяющие восстанавливать меру в волноводе. Была продемонстрирована возможность восстановления электронной концентрации $n(h)$ для высот выше волновода. Также отметим, что уже после выполнения программы удалось снять условие ортогональности направления магнитного поля плоскости радиозондирования. Таким образом, можно говорить о решении важной прикладной проблемы волноводов при радиозондировании ионосферы.

Д.ф.-м.н. Александр Илларионович Короткий,

к.ф.-м.н. Игорь Анатольевич Цепелев

Тесная кооперация рабочих групп из двух Институтов (от МИТПАН – Б.М. Наймарк, А.Т. Исмаил-Заде, от ИММ – А.И. Короткий, А.П. Суетов, И.А. Цепелев) в области исследования термомеханического поведения коры и верхней мантии Земли посредством трехмерных численных моделей геофизической гидродинамики, а также решения задач реконструкции неизвестных параметров в рамках этих моделей, началась с грантов МНТЦ в 1996 г. и продолжается в настоящее время.

Работы в данном направлении начались с задачи численного моделирования формирования осадочных бассейнов в рамках представления верхних слоев Земли как высоковязкой жидкости (динамическая вязкость которой $\sim 10^{16}$ Па·с), в которую погружаются более плотные включения (эклогитовые линзы). Это погружение приводит к опусканию дневной

поверхности Земли, которое со временем (порядка миллиона лет) заполняется осадочными породами. Постоянное внимание многих ученых к этой проблеме обусловлено, помимо ее большой научной значимости, соображениями прикладного характера, так как с осадочными бассейнами связаны основные нефтегазовые запасы Земли. Математическая модель процесса представляет собой совокупность стационарного уравнения Навье–Стокса, уравнения несжимаемости и эволюционных уравнений переноса плотности и вязкости. Расчет сложных задач, связанных с решением систем уравнений с частными производными, всегда представляет собой довольно сложную проблему как с алгоритмической, так и с вычислительной точки зрения. Многопроцессорные вычислительные системы (в начале работ это была система МВС-100, установленная в ИММ УрО РАН) позволили провести компьютерное моделирование данной задачи с приемлемой точностью за разумное время.



А.И. Короткий и А.Т. Исмаил-Заде на границе Азии и Европы (рабочее совещание научных групп, г. Екатеринбург, сентябрь 2007 г.)

Данное направление получило развитие в задачах моделирования процессов эволюции соляных структур (рис. 1), в исследовании тепловой конвекции в мантии Земли (рис. 2), в изучении влияния континентов на структуру тепловых потоков в мантии. В частности, было проведено компьютерное моделирование процесса зарождения, развития и формирования плюма (диапира), вызванного внутренней гравитационной неустойчивостью неоднородной среды. Отличительной особенностью такого исследования задач тепловой конвекции является их моделирование как в прямом, так и в обратном времени. Ретроспективное моделирование позволяет реконструировать историю развития неоднородных сред, в частности, восстанавливать эволюцию солеродных бассейнов и более четко понимать причину тех или иных геофизических явлений. Наша группа стояла у истоков данного направления исследований в мировой науке.

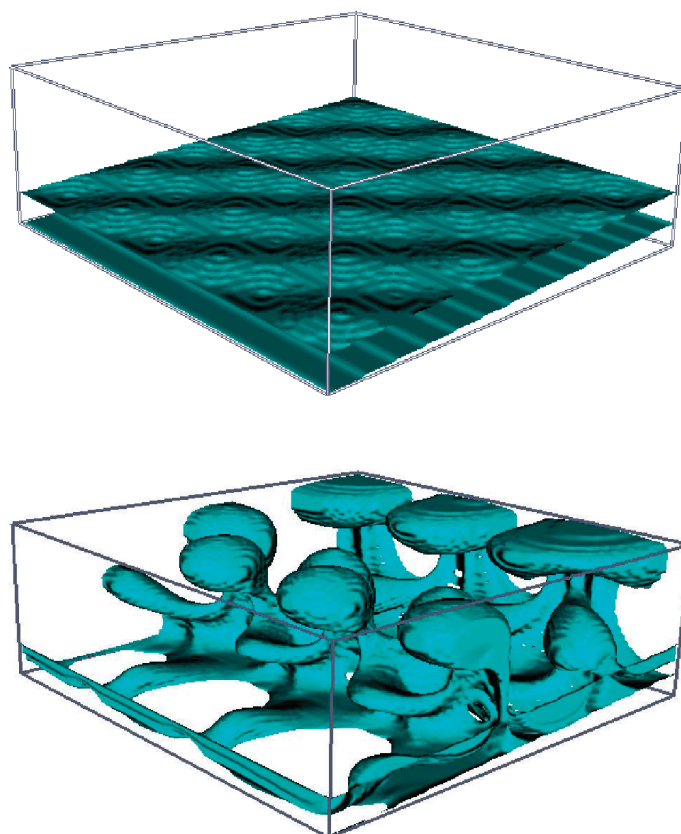


Рис. 1. В начальный момент времени наклонный слой жидкости находится между двумя более вязкими и тяжелыми слоями (верхний кадр). Возмущения на поверхности разделов сред являются начальной фазой зарождающихся диапиров, которые развиваются во времени вследствие внутренней гравитационной неустойчивости системы (финальное состояние системы на нижнем кадре).

По результатам: Исмаил-заде и др., 2000; Ismail-Zadeh et al. 2001.

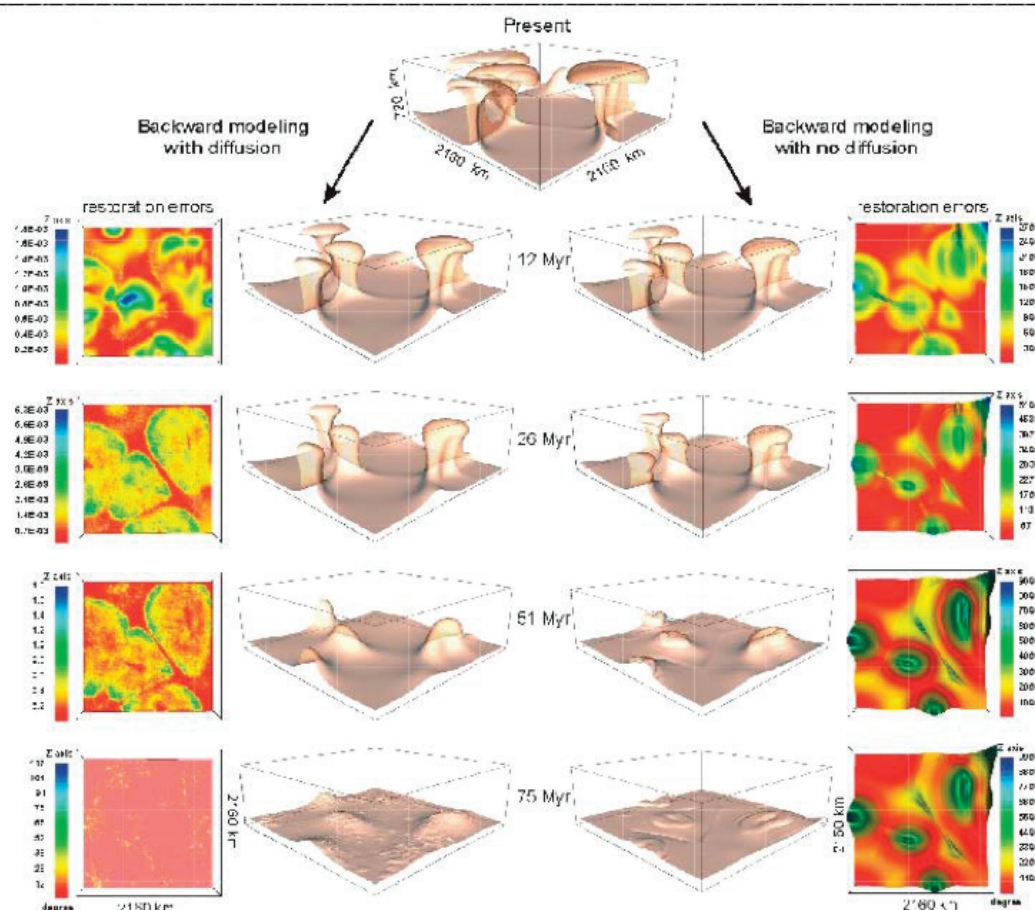


Рис.2. Восстановление истории развития мантийного плюма на период времени 75 млн. лет. (ретроспективная задача тепловой конвекции жидкости). Демонстрируется динамика изоповерхности раздела нагретого вещества по отношению к более холодному веществу окружающей мантии. Слайды на левой панели показывают развитие структуры с учетом диффузии, в правой панели учет диффузии не производился. По результатам: Ismail-Zadeh et al. 2006.

Упомянутые модели рассматривались в пространственных областях, что приводило к возникновению дискретных задач высокой размерности. В то время в нашей стране только начинали появляться вычислительные кластеры с достаточными ресурсами для решения таких задач. ИММ УрО РАН был среди пионеров в освоении и внедрении такой техники и соответствующего программного обеспечения. Кооперация с МИТПАН позволила тестировать возможности кластера на решении серьезных прикладных проблем. Однако основным средством решения оставались ПЭВМ, на которых создавались интерфейсные программы (с привлечением анимационной машинной графики) для получения исходных массивов данных, обрабатываемых в дальнейшем на мультипроцессорном кластере.

Результаты такой обработки экспортировались обратно на ПЭВМ с целью наглядного представления и анализа больших массивов данных.

В 90-е годы Россия значительно отставала от мирового уровня в области создания, а главное, применения мультипроцессорных кластеров. В 1994 г. в ИММ УрО РАН началось создание суперкомпьютерного вычислительного центра на базе отечественных ЭВМ серии МВС-100, МВС-1000, и наличие проектов МНТЦ способствовало обучению специалистов и наработке опыта использования вычислительной техники нового поколения. Тогда же у нас появился опыт использования вычислительного кластера IBM SP2 в КТН (Высшая техническая школа, Стокгольм, Швеция), и программного обеспечения для него. Это позволило в дальнейшем создавать программные коды для прикладных задач на отечественной вычислительной базе с учетом мировых трендов в этом направлении. Мы пересекались в Стокгольме с А.А. Соловьевым, где он считал свои задачи на мультипроцессорном кластере. Александр Анатольевич был квалифицированным программистом, но в то время не имел представления о применении кластеров, и наше взаимодействие строилось на обмене взаимно-полезной информацией в рабочем процессе. Неформальные чаепития на институтской кухне сводились к обсуждению, помимо технических вопросов, текущей обстановки в стране и ситуации в российской науке. С Александром Анатольевичем было очень интересно общаться, он обладал чувством юмора, эрудицией, имел большой опыт общения и сотрудничества с зарубежными учеными, умел изложить свою точку зрения на конкретных примерах из жизни. А.А. Соловьев придерживался позиции, что наша страна должна проводить самостоятельную финансовую политику, и тогда денег хватит на все, в том числе и на науку, которая, в свою очередь, внесет вклад в создание новой промышленной базы.

В заключении краткого представления данного направления сотрудничества приведем еще один из совместно полученных результатов:

ретроспективное восстановление состояний в верхней мантии Земли в районе Южных Карпат (Вранча). Неоднородности теплового состояния мантии в настоящем были получены с помощью сейсмической томографии в Южных Карпатах, была разработана математическая модель термоконвективных течений и проведено компьютерное моделирование эволюции теплового состояния мантии во времена миоцена (рис. 3).

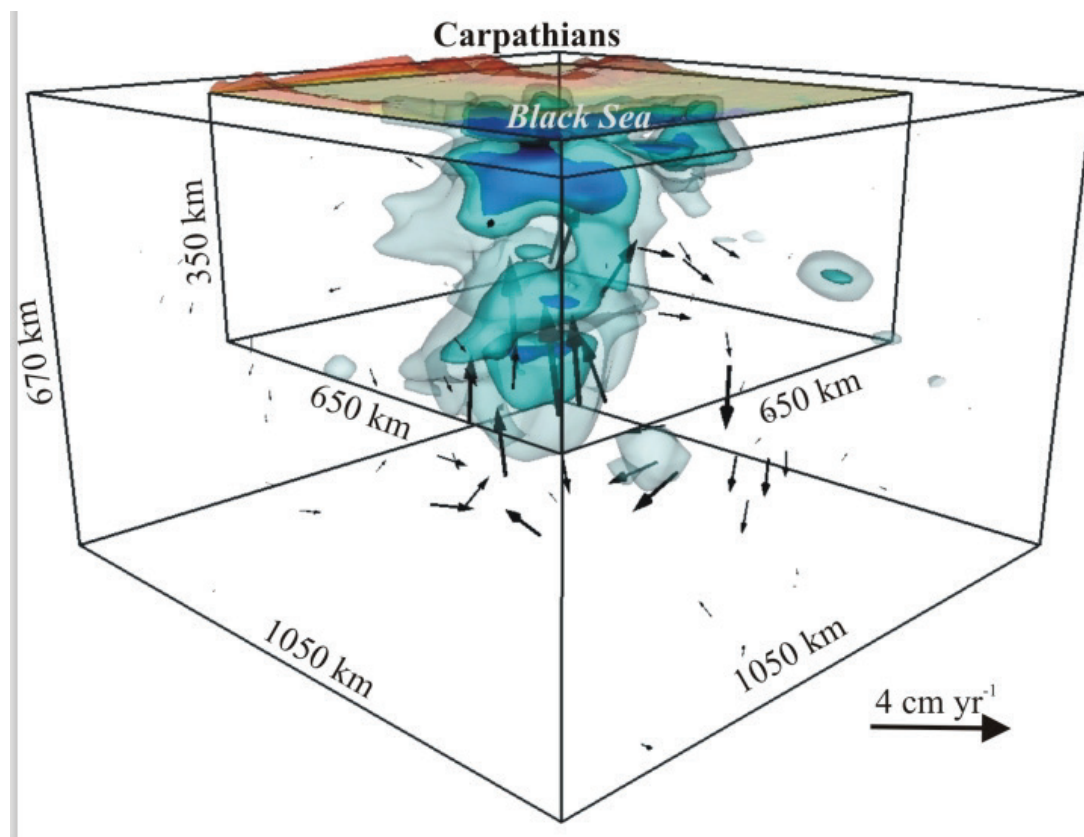


Рис. 3. Термическая эволюция опускающейся плиты Вранча со времен миоцена. Температурные аномалии $\delta T = 7\%$, 14% и 20% изображены оттенками голубого цвета. По результатам: Ismail-Zadeh et al. 2008; Ismail-Zadeh et al. 2009

Д.ф.-м.н. Вячеслав Иванович Максимов

С Александром Анатольевичем Соловьевым я познакомился, когда впервые приехал в МИТПАН, находившийся тогда на Варшавке, с целью обсуждения задач, которые следовало выполнять нашему сектору в рамках первого проекта МНТЦ. Александр Анатольевич рассказал о себе, о том, чем занимался раньше как физик по специальности. Отметил, что в настоящее время по совету академика В.И. Кейлис-Борока он занимается, в том числе,

развитием блоковых моделей и их применением к моделированию сейсмичности в различных регионах мира. Так мы и определили первый круг совместных задач. Второй круг, опять же по рекомендации Александра Анатольевича, был определен после того, как он познакомил меня с известными специалистами Б.Г. Букчиным и А.В. Ландером, с которыми в дальнейшем мы активно сотрудничали и с которыми у нас были совместные работы. Уже во время первой беседы меня поразила высокая интеллектуальность, тонкость натуры, интеллигентность Александра Анатольевича, его способность заинтересовать собеседника своими задачами. В последующие годы, именно во многом благодаря этим его качествам, у нас в институте продолжались работы по моделированию глобальной сейсмичности, несмотря на то, что формально проекты МНТЦ уже давно закончились. В конце 90-х годов, во время одного из моих приездов в МИТПАН, Александр Анатольевич познакомил меня с вернувшимся тогда из Австралии В.А. Желиговским. В результате совместных бесед нам удалось согласовать план новых исследований, которые отразились в проекте ИНТАС–РФФИ. С середины 90-х наш отдел активно сотрудничал с проектом (им руководила профессор Дж. Линнерут-Байер), занимавшимся рисками в Институте прикладного системного анализа (IIASA) в г. Лаксенбург (Австрия). Значительная часть этих исследований выполнялась совместно с Александром Анатольевичем и была связана с моделированием глобальной сейсмичности на многопроцессорной вычислительной технике, которая имела в Институте математики и механики УрО РАН. При этом использовались авторские модели Александра Анатольевича и их модификации. Результаты этих исследований докладывались не раз на семинарах и конференциях, проходивших в этом Институте, и отражены в опубликованных статьях и препринтах IIASA. Поездки в Австрию совершались обычно через Москву, что позволяло регулярно встречаться с Александром Анатольевичем, в результате чего он, как говорят, постоянно держал руку на пульсе исследований. Сотрудники нынешнего отдела дифференциальных уравнений, долгое время

сотрудничавшие с Александром Анатольевичем Соловьевым, с глубоким прискорбием узнали о его безвременном уходе из жизни в самом расцвете сил. Очень жаль расставаться с таким замечательным, тонким, душевным человеком.

К.ф.-м.н. Борис Вадимович Дигас

Участие в совместных с МИТПАН проектах МНТЦ останется незабываемой страницей в биографии многих исследователей из ИММ УрО РАН. И неоценимую роль в плодотворном сотрудничестве двух институтов сыграли умелая координация и чуткое наставничество со стороны А.А. Соловьева. Александр Анатольевич запомнился нам как блестящий ученый и отзывчивый, душевный человек. Его организаторский талант воплощался и в том, какой коллектив он вокруг себя собрал, и в том, как выстраивалась работа по проектам.

Проекты МНТЦ благотворно повлияли и на материальное положение институтов, и на научную жизнь. Закупалась новая вычислительная и офисная техника, завязывались новые международные связи. Даже молодые научные сотрудники по несколько раз за 1990-е годы побывали в заграничных командировках, что в обычных условиях было трудно себе представить. Весьма полезными оказались курсы разговорного английского, организованные на базе кафедры иностранных языков Президиума УрО РАН. В совместных рабочих группах решались интересные и новые для нас прикладные задачи.

Так, в группе под руководством Б.Г. Букчина и В.И. Максимова исследовалась задача лучевой сейсмической томографии – обратная задача восстановления поля скоростей по неточным измерениям времени пробега поверхностных волн. Поскольку задача является некорректной, для ее решения требовалось применение регуляризирующих алгоритмов. Был предложен метод решения, при котором задача минимизации нелинейного функционала сводилась к нахождению минимального решения системы линейных неравенств в бесконечномерном пространстве. Для этого

применялся итерационный алгоритм, отличавшийся быстрой сходимостью и устойчивостью к помехам. Была также создана и апробирована его параллельная версия.

К.ф.-м.н. Виктор Борисович Костоусов

В грустные времена, когда наша команда, руководимая профессором В.Л. Гасиловым, переживала «внезапный» обрыв связей с оборонной промышленностью, прекращение востребованности наших разработок и, как следствие, безденежье, на горизонте, начиная с 1994 г., возникла поддержка в виде проектов МНТЦ и новая для нас тематика, связанная с геофизикой и прогнозом землетрясений. Это поддержало команду, причем не только в материальном отношении, но и переключением нашего внимания на фундаментальные проблемы планеты Земля.

Александр Анатольевич Соловьёв был одним из тех, кто, будучи экспертом в решении геофизических и сейсмических проблем, вводил нас в эту тематику. Очень умело, мягко, ненавязчиво и, в тоже время, настойчиво и методично он руководил нашим вхождением в новую область науки. Я это прочувствовал на себе, когда в мой первый выезд за границу в 1994 г. на XXIV Генеральную Ассамблею Европейской сейсмологической комиссии, проходившую в Афинах, Александр Анатольевич меня поддержал своим примером и мудрыми советами как в научных, так и в бытовых вопросах: он поселил меня в свой номер в гостинице, и я имел возможность многому у него научиться. Низкий поклон и огромное ему за это спасибо!

В результате работ по проектам МНТЦ появились новые научные связи, в том числе с зарубежными учёными, состоялись командировки в Грецию, США, Италию и Нидерланды. Нашей команде удалось получить новые интересные результаты по методам фрактального моделирования множества эпицентров землетрясений, по методам обработки космических снимков с целью морфоструктурного районирования возможных мест сейсмической активности, по новым способам моделирования динамики земной коры и другим темам. В частности, во время визитов в Корнельский

университет (США, 1996–1997 гг.) состоялись встречи и семинары с проф. Д. Туркоттом и его коллегами, на которых обсуждались, со взаимным интересом, результаты по автоматизации морфоструктурного анализа и по фрактальному моделированию сейсмичности.

К.ф.-м.н. Игорь Николаевич Кандоба

До сих пор я с большим удовольствием вспоминаю общение с Борисом Григорьевичем Букчиным и Александром Ивановичем Горшковым, с которыми мне довелось обсуждать некоторые задачи в рамках проектов МНТЦ и участвовать в их решении.

Невозможно забыть исключительно доброжелательное отношение Бориса Григорьевича ко мне, тогдашнему молодому специалисту Института математики и механики, которому он поистине по-товарищески терпеливо объяснял постановки и специфику ряда геофизических задач. Так, например, его очень продуктивная идея о специальном представлении тензора упругих параметров позволила нам предложить и численно исследовать одну математическую модель скоростной анизотропии сейсмических волн в однородных средах, базирующуюся на лучевой теории распространения волн. Как представляется, эта модель достаточно конструктивно учитывала некоторые известные доминирующие источники скоростной анизотропии сейсмических волн в среде, именно, неравномерность распределения напряжений по различным направлениям в ней и имеющееся всеобщее распространение в земной коре ориентированных трещин и микротрещин (экстенсивно-дилатансионная анизотропия). Очень приятные воспоминания остались у меня и о нашей совместной служебной командировке с Борисом Григорьевичем и Вячеславом Ивановичем Максимовым в Британскую геологическую службу (BGS, Эдинбург, Великобритания, декабрь 1994 г.), где Борис Григорьевич оказал нам неоценимую помощь в контактах со специалистами этой организации во время научных дискуссий.

Александр Иванович Горшков помог нам применить имеющийся у нашего коллектива опыт в обработке и анализе данных дистанционного зондирования Земли, в основном, космоснимков поверхности Земли, для решения некоторых задач морфоструктурного районирования. Самые позитивные воспоминания остались у меня от его очень внимательного отношения к нашим предложениям по разработке программного комплекса «МОСТ», предназначенного для решения некоторых прикладных задач геофизики. В частности, инструментальные средства этого комплекса в какой-то мере позволяли выделять и идентифицировать на космоснимках земной поверхности изображения небольшого числа геофизических объектов и структур, а также систематизировать полученную информацию в специализированном банке данных. С помощью Александра Ивановича были разработаны структура и формат данных этого банка, которые допускают его подключение к существующим, широко используемым в то время, геоинформационным системам (например, «ARC/INFO»).

К.ф.-м.н. Валерий Львович Розенберг

Сотрудничество ученых МИТПАН и ИММ УрО РАН в области моделирования динамики и сейсмичности систем литосферных блоков началось в рамках уже не раз упомянутого гранта МНТЦ. Мне довелось присутствовать при самом первом разговоре о возможной кооперации наших институтов в рамках конверсионного проекта. Он состоялся в 1992 г. в здании Президиума РАН на Ленинском проспекте, 32, при активном участии Президента РАН Юрия Сергеевича Осипова. Александр Анатольевич Соловьев очень обстоятельно и убедительно изложил гипотетические направления сотрудничества Аркадию Викторовичу Кряжимскому, представлявшему наш институт. Помню оживленную уважительную дискуссию между ними, обсуждение конкретных задач, вопросы/ответы... В итоге поначалу казавшийся утопией (по причине своего размаха) проект обрел реальные черты и был запущен в кратчайшие сроки. Я же, будучи под впечатлением от самого Александра Анатольевича и его задач, постарался

записаться в группу, которой предстояло заниматься моделированием динамики и сейсмичности литосферы. Со стороны ИММ эту группу возглавил д.ф.-м.н. Виталий Леонидович Гасилов, который предложил свою трехмерную модель взаимодействия большого числа разнородных деформируемых элементов. Другим направлением, к которому подключился и я с коллегами (Л.А. Мельникова, на первом этапе Б.В. Дигас, И.А. Цепелев, позже П.О. Соболев из Санкт-Петербурга), стало изучение и модификация моделей, описывающих динамику системы абсолютно жестких макроблоков. К тому моменту Александром Анатольевичем и его коллегами была разработана плоская двумерная модель, выполнена ее программная реализация и проведены численные эксперименты как для модельных, так и для реальных структур. В период первого проекта МНТЦ (1994–1997) была создана интерактивная версия «двумерной» программы (с ориентацией на использование в процессе обучения студентов на традиционных Школах по нелинейной динамике и прогнозу землетрясений в Триесте) и разработана трехмерная модификация плоской блоковой модели.



А.А. Соловьев и В.Л. Розенберг (слева) на Международной школе по нелинейной динамике и прогнозу землетрясений (г. Триест, Италия, октябрь 2003 г.)

Идея переноса блоковой модели на сферу с целью моделирования процессов в крупных структурах (например, в системах тектонических плит), когда влияние сферичности земной поверхности существенно, а использование плоских модификаций приводило к значительным погрешностям, принадлежала Александру Анатольевичу. Хорошо помню наш разговор поздним осенним вечером в 1998-м году в здании МИТПАН на Варшавке, с которого и началась история развития сферической блоковой модели. Я был поражен, насколько глубоко А.А. продумал как некоторые вычислительные аспекты, так и специфику применения новой модели. Затем разработка модели продолжилась в рамках второго проекта МНТЦ (1999–2002) и далее, существенно ускоряясь во время наших регулярных встреч с А.А. на триестинских Школах вследствие конструктивных очных дискуссий. Я очень благодарен Александру Анатольевичу за возможность интереснейшей работы на Школах в Триесте, где он был бессменным содиректором. Прекрасную организацию, локацию и продуктивность Школ, неформальные встречи и разговоры с коллегами из МИТПАН и других институтов обо всем я вспоминаю очень часто и с особенной теплотой. А.А. принимал активное участие в обсуждении всех этапов усовершенствования модели, всегда был на связи, всегда был готов вникнуть в проблему и посоветовать пути ее решения. В частности, он позитивно отреагировал на идею сочетания параллельных технологий в вычислительных процедурах и интерактивного онлайн ввода/вывода в сервисных.

Приведу краткое описание современной версии сферической блоковой модели динамики литосферы и сейсмичности. Данный подход к моделированию опирается на представление тектонических плит в виде системы абсолютно жестких блоков на сфере. Блоковая структура является ограниченной и односвязной частью шарового слоя переменной глубины, заключенного между двумя концентрическими сферами, одна из которых

(внешняя) интерпретируется как поверхность Земли, другая (внутренняя) — как нижняя граница упругой литосферы. Разделение структуры на блоки определяется пересекающими этот слой бесконечно тонкими разломами, каждый из которых представляет собой коническую поверхность, наклоненную под определенным углом к внешней сфере. Во все моменты времени система находится в состоянии квазистатического равновесия; при этом модельным событием является резкий сброс напряжений, возникающих на разломах, разделяющих блоки, под действием внешних сил со стороны граничных блоков (при их наличии) и подстилающей среды. Важной особенностью сферической модели является возможность задания замкнутой блоковой структуры, покрывающей всю поверхность Земли. В этом случае источником модельных трансформаций является движение подстилающей среды, которое определяется как вращение на сфере согласно модели HS3-NUVEL1. Основными результатами моделирования служат искусственный каталог землетрясений, в котором событие характеризуется моментом времени, координатами эпицентра, глубиной и магнитудой, а также характеристики взаимодействия элементов блоковой структуры (напряжения, силы, смещения на разломах и границе литосфера/мантия). В качестве базовых характеристик, определяющих качество моделирования, рассматриваются пространственное распределение сильных событий, закон повторяемости Гутенберга–Рихтера, возможности кластеризации и миграции событий, а также типы межблочных границ. Калибровка модели осуществляется с помощью минимизации на множестве допустимых значений параметров модели специального функционала, представляющего собой, с учетом перечисленных критериев, взвешенную сумму отклонений модельных и реальных данных. Одной из последних по времени модификаций было введение стохастической компоненты в процедуры вычисления сил, действующих на блок и фактически определяющих

модельные землетрясения, через «зашумление» дифференциальных уравнений динамики сил и смещений и через использование случайных величин при задании порогов прочности среды тектонических разломов. Такие дополнения были призваны отразить в рамках блоковой модели неподдающуюся точному аналитическому описанию и фактически непредсказуемую изменчивость прочности среды разломов. Вычислительные эксперименты подтвердили, что внедрение в модель элементов случайности улучшило свойства искусственной сейсмичности по сравнению с предыдущими версиями модели. Современная версия модели реализована в виде пакета программ, ориентированного на многопроцессорную технику в вычислительных процедурах, что обеспечило возможность использования в расчетах реальных геофизических и сейсмических данных.

В качестве примера приведу результаты моделирования пространственного распределения сильных событий (рис. 4). С учетом отсутствия модельных событий внутри блоков (ввиду специфики всех блоковых моделей) и неоднозначности соответствия единиц модельного и реального времени, в искусственном каталоге очевидным образом можно идентифицировать ряд черт, присущих реальной сейсмичности. Отмечу любопытный факт. В статье за авторством Мельниковой Л.А., Розенберга В.Л., Соболева П.О. и Соловьева А.А., вышедшей в журнале «Вычислительная сейсмология» в середине 2004 г., были приведены результаты моделирования, похожие на рис.4. После катастрофического землетрясения в Индонезии в декабре того же года некоторые далекие от геофизики и сейсмологии журналисты, вдруг ознакомившись со статьей и обнаружив сильнейшие модельные события рядом с реальным эпицентром, стали рассуждать о возможностях краткосрочного прогноза посредством блоковой модели. А.А. доходчиво и терпеливо разъяснял реальное положение дел.

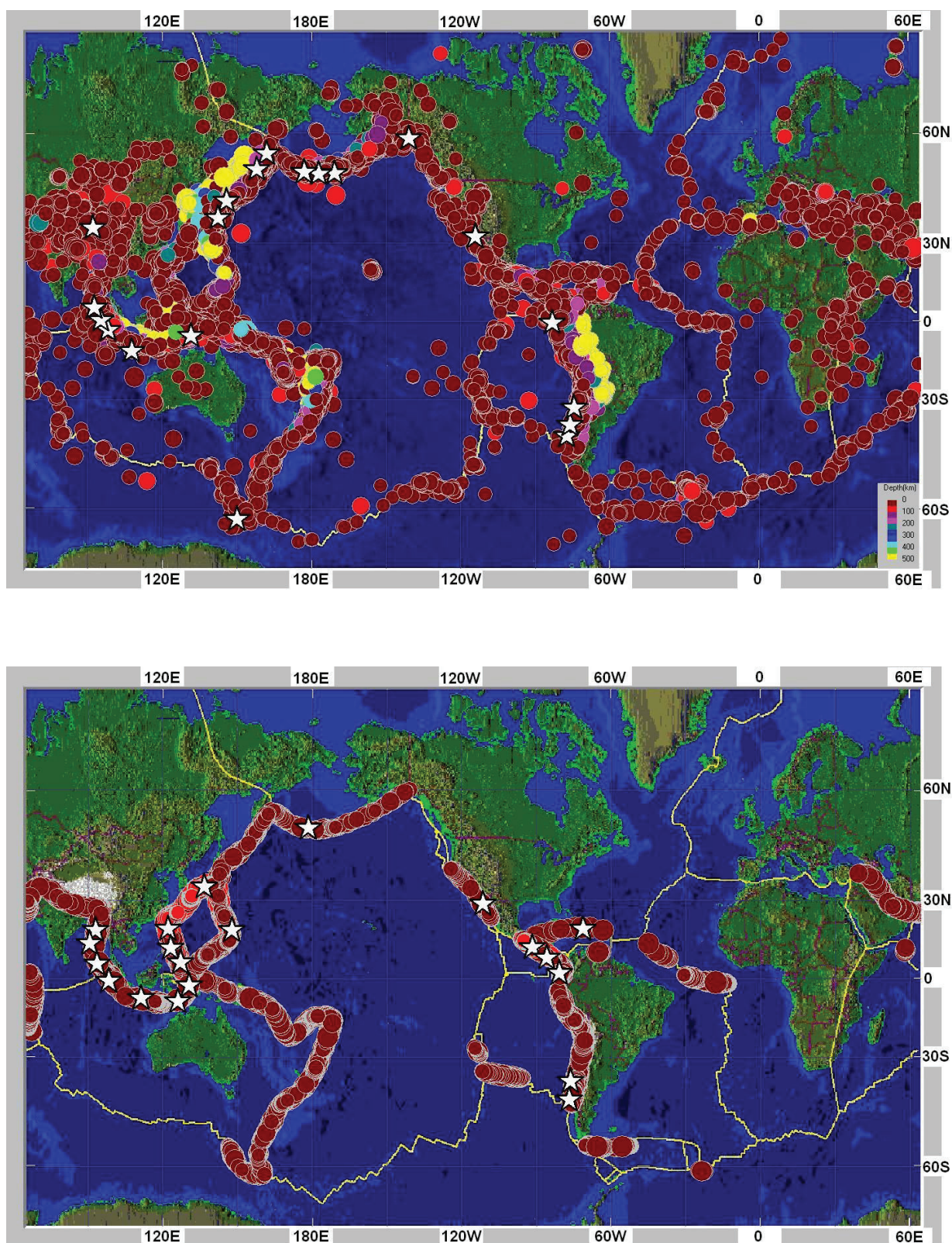


Рис. 4. Сравнение зарегистрированной (верхний рисунок, каталог NEIC, 01.01.1900–31.12.2019) и модельной (нижний рисунок, модельный каталог, 120 единиц безразмерного времени) сейсмичности: показаны эпицентры сильных событий с $M \geq 6.0$, 20 сильнейших событий отмечены звездочками. По результатам: Rozenberg, 2020.

Следует отметить, что упомянутые здесь результаты моделирования (равно как и другие) в целом хорошо согласуются с реальными данными, но вопрос о возможности их эффективного практического применения, например, в экспертных системах мониторинга регионального и глобального сейсмического риска, остается открытым. Последней значимой модификацией модели, которую удалось обсудить с А.А., стало создание модуля наглядной визуализации пошаговых результатов моделирования, что позволило отследить в динамике миграцию модельных событий вдоль тектонических разломов и изучить влияние параметров модели на распределение напряжения в структуре. Сейчас для каких-либо серьезных продвижений очень не хватает советов и ремарок Александра Анатольевича. Совершенно невозможно смириться с тем, что их больше не будет.

НЕКОТОРЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОТРУДНИЧЕСТВА ИММ И ИТПЗ

Агеев А.Л., Васин В.В., Бессонова Э.Н., Киселев С.Г., Маркушевич В.Н.

Наклонное зондирование как метод определения электронной концентрации в долине // Геомagnetизм и аэрономия. Вычисл. сейсмология, вып. 30. М.: Наука, 1999, С. 74–78.

Агеев А.Л., Васин В.В., Бессонова Э.Н., Маркушевич В.Н., Киселев С.Г.

Определение электронной концентрации внутри ионосферного волновода по скачку тау-функции на нем // Вопросы геодинамики и сейсмологии. М.: ГЕОС, 1998, С. 225–233.

Бессонова Э.Н., Маркушевич В.Н., Савин И.В., Агеев А.Л., Васин В.В.

Обратная задача радиозондирования ионосферы при наличии волноводов (долин). Единственность решения // Теоретические проблемы в геофизике. Вычисл. сейсмология, вып. 29. М.: Наука, 1997, С. 81–99.

Букчин Б.Г., Ландер А.В., Дигас Б.В., Максимов В.И. Об одном

алгоритме решения обратной задачи лучевой сейсмики // Вычисл. сейсмология, вып. 30. М.: Наука, 1998, С. 207–224.

Букчин Б.Г., Ландер А.В., Дигас Б.В., Максимов В.И., Мельникова Л.А.

Параллельные алгоритмы в обратной задаче лучевой сейсмики // Сб. «Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений», ИММ УрО РАН, 1999, вып. 3, С. 3–15.

Букчин Б.Г., Дигас Б.В., Максимов В.И. К проблеме реконструкции

интенсивности точечных источников по результатам сенсорных наблюдений // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН, 1996, т. 4, С. 201–216.

Горшков А.И., Кандоба И.Н., Сафронович Е.Л., Сладков И.В.

Автоматизированный анализ геолого-геоморфологической информации при морфоструктурном районировании // Вопросы геодинамики и сейсмологии. М.: ГЕОС, 1998, С. 336–347 (Вычислительная сейсмология, Вып. 30).

Исмаил-заде А.Т., Цепелев И.А., Тэлбот К., Остер П. Трехмерное моделирование соляного диапиризма: численный подход и алгоритм параллельных вычислений // *Вычислительная сейсмология*, вып. 31, М.: Наука, 2000. С. 62–76.

Костоусов В.Б., Кронрод Т.Л., Писаренко В.Ф. Обработка изображений и моделирование множества эпицентров // *Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли*. М.: Наука, 1996, С. 175–192. (Вычисл. сейсмология, вып. 28).

Мельникова Л.А., Розенберг В.Л., Соловьев А.А. Применение параллельных технологий к моделированию динамики и сейсмичности литосферы. В кн. «Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности». Москва: Изд-во МГУ им. М.В.Ломоносова, 2010, С. 77–80.

Berdyshev V.I., Berdyshev S.V., Kondratiev V.P., Kostousov V.B., Maligin J.V. On compression and modelling of images // *Russian Journal of Numerical Anal. and Math. Modelling*, 1996, Vol. 11, No. 4, P. 275–285.

Ismail-Zadeh A.T., Korotkii A.I., Naimark B.M., Tsepelev I.A. Numerical modelling of three-dimensional viscous flow under gravity and thermal effects // *Comput. Math. & Math. Phys.*, 2001, Vol. 41, P. 1428–1444.

Ismail-Zadeh A., Schubert G., Tsepelev I., Korotkii A. Three-dimensional forward and backward numerical modeling of mantle plume evolution: Effects of thermal diffusion // *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, 06401.

Ismail-Zadeh A., Schubert G., Tsepelev I., Korotkii A. Thermal evolution and geometry of the descending lithosphere beneath the SE-Carpathians: An insight from the past // *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, Vol. 273, Issue 1–2, P. 68–79.

Ismail-Zadeh A., Korotkii A., Schubert G., Tsepelev I. Numerical techniques for solving the inverse retrospective problems of thermal evolution of the Earth interior // *Computers and Structures*, 2009, Vol. 87, Issue 11–12, P. 802–811.

Koustousov V.B. Image processing and modelling of earthquake catalog // Proceedings and Activity Report 1992–1994, XXIV General Assembly ESC, Athens, 1995, V3, P. 1276–1285.

Rozenberg V.L., Sobolev P.O., Soloviev A.A., Melnikova L.A. The spherical block model: dynamics of the global system of tectonic plates and seismicity. Pure. Appl. Geophys, 2005, Vol. 162, P. 145–164.

Rozenberg V.L. Block Model of Lithosphere Dynamics: New Calibration Method and Numerical Experiments. In: Sokolinsky L., Zymbler M. (eds) Parallel Computational Technologies. PCT 2020. Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham, 2020, Vol. 1263, P. 181–197.

Чл-корр. РАН Ан.А.Соловьев¹, А.К.Некрасова²

1 - Геофизический центр РАН

2-Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ. ПРОЕКТ РОССИЙСКОГО НАУЧНОГО ФОНДА (2015-2017 ГГ.)

С 2015 по 2017 гг. Александр Анатольевич руководил проектом «Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье», который был поддержан Российским научным фондом (РНФ) в рамках исследований, проводимых в Геофизическом центре Российской академии наук (ГЦ РАН, г. Москва). С ГЦ РАН Александра Анатольевича объединяли многолетняя научная работа и крепкие дружеские контакты. Поэтому к участию в проекте были привлечены ведущие исследователи как ГЦ РАН, так и Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики, директором которого Александр Анатольевич был на протяжении почти 20 лет.



Облако ключевых слов проекта «Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье»

Вместе с Александром Анатольевичем ключевыми исполнителями проекта были академик РАН, профессор, доктор физико-математических наук Алексей Джерменович Гвишиани, доктора физико-математических наук Александр Иванович Горшков и Владимир Григорьевич Кособоков, а также кандидат физико-математических наук Борис Аркадьевич Дзедобоев (в настоящий момент д.ф.-м.н.).

Проект был посвящен уменьшению последствий природных и природно-техногенных катастрофических событий, которые являются сложнейшей фундаментальной научной проблемой, имеющей большое научно-техническое, социальное и экономическое значение. Ее актуальность непрерывно возрастает в связи с быстрым ростом плотности населения, увеличением техногенной нагрузки на природный комплекс, развитием экологически опасных производств (ядерно-энергетический комплекс, химическая промышленность, военно-промышленный комплекс и т.д.), а также расширением горнорудного производства, добычи нефти и газа. По данным ООН сейсмические катастрофы составляют около 51% от общего числа природных катаклизмов. Землетрясения представляют собой экстремальные явления, происходящие в сложной системе – литосфере Земли. Они связаны с динамикой литосферных плит, накоплением тектонических напряжений и их концентрированным сбросом. Сильнейшие землетрясения происходят редко, но имеют серьезные экономические и финансовые последствия, сопровождающиеся человеческими жертвами. Современные методы оценки сейсмической опасности, хотя и достаточно развиты, не всегда способны достаточно подробно охарактеризовать определенный регион на предмет реальной опасности от возможного сильного землетрясения. При этом получаемые классическими методами сейсморайонирования результаты могут в конкретных местах давать заниженные оценки уровня сейсмического потенциала территории, например, события в Аквиле, (Италия) 2009; Гаити, 2010; Чили, 2010; Тохоку (Япония), 2011 и др.). Поэтому совершенствование существующих и

разработка новых методов адекватной оценки сейсмической опасности являются актуальными фундаментальными научными задачами, нацеленными на решение важнейшей проблемы сокращения потерь, связанных с природными катастрофами. Учитывая многофакторность процессов, приводящих к землетрясениям, решение этих задач может быть достигнуто лишь на основе применения комплекса методов и последующего системного анализа получаемых результатов. Около четвертой части территории Российской Федерации, на которой расположены 27 субъектов РФ с населением более 20 млн. человек, находится в сейсмоактивных регионах. Одновременно в зонах слабой сейсмической активности заметный сейсмический риск, часто связанный с большой плотностью населения и застройки, может быть обусловлен возможностью сотрясений, вызванных сильными землетрясениями в сопредельных районах. Объекты горного производства и гидроэнергетики часто расположены в горных районах, характеризующихся повышенной сейсмической опасностью. Здесь же стремительно развиваются рекреационные объекты, ведется строительство горнолыжных курортов и соответствующих объектов инфраструктуры. Сегодня РФ проводит дорогостоящие мероприятия, направленные на развитие промышленности, туризма, сельского хозяйства и частного бизнеса в Крыму (население 2,2 млн. человек). Этим определяется выбор региона Кавказ-Крым в качестве одного из территориальных фокусов проекта. В проекте был разработан новый системный алгоритмический подход к оценке сейсмической опасности двух сейсмоактивных районов РФ (Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье) и созданы ГИС-приложения, реализующие интерактивные карты такой опасности. Результатом проекта является создание оригинальной, многофакторной, интеллектуальной, геоинформационной системы. Она интегрировала методами системного анализа целый ряд существующих и разработанных в рамках проекта подходов к определению мест возможного возникновения сильных землетрясений и других характеристик сейсмической опасности. Системно

интегрируемые в рамках проекта методы включают в себя распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений FCAZ (кластеризация эпицентров землетрясений) и ЕРА (распознавание мест сильных землетрясений на основе морфоструктурного районирования), моделирование динамики систем блоков, разломов и сейсмичности, феноменологический формализованный анализ каталогов землетрясений. Решение поставленной в проекте задачи дает возможность существенно усилить достоверность сейсмического районирования РФ. Одновременно в проекте впервые сделана попытка создать алгоритмическую систему искусственного интеллекта для оценки сейсмической опасности. Последнее обосновывает актуальность проекта в теоретическо-алгоритмическом аспекте. Созданная в проекте система искусственного интеллекта для оценки сейсмической опасности имеет и глобальное значение, поскольку применима к другим сейсмоактивным регионам. Научная новизна проекта определяется применением для оценки сейсмической опасности в рассматриваемых регионах РФ нескольких, взаимодополняющих подходов, включая вновь разработанные, и интеграцией результатов методами системного анализа. При оценке сейсмической опасности использованы следующие подходы:

- геолого-геофизическое районирование территорий и определение их блоковой структуры;
- определение геолого-геофизических параметров зон высокой сейсмической опасности;
- распознавание потенциальных мест возникновения сильных землетрясений по комплексу геолого-геофизических данных;
- распознавание потенциальных высокосейсмичных зон с помощью кластеризационной системы (FCAZ-M);
- моделирование сейсмичности и геодинамики на основе реальной геометрии разломно-блокового строения территории;
- картирование сейсмической опасности на основе Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ), обобщающего фундаментальное соотношение Гутенберга-Рихтера.

Многофакторная системная оценка сейсмической опасности в двух российских регионах включает в себя информацию о местоположении потенциальных очагов землетрясений разной силы, в том числе наиболее сильных, и карты сейсмической опасности на основе ОЗПЗ.

Под руководством Александра Анатольевича все цели и задачи были полностью выполнены и решены. Результаты работы коллектива проекта за три года его выполнения представлены в 14 публикациях в ведущих Российских и международных журналах, таких как «Доклады академии наук», «Физика Земли», «Вулканология и сейсмология», «Natural Hazards», «Pure and Applied Geophysics», «Journal of Seismology» и двух базах данных. Результаты исследований были представлены на международных и всероссийских конференциях, а также на двух школах молодых ученых 2016 и 2017 гг., которые были проведены в рамках проекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА И ИХ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

О масштабности и комплексности проекта, направленного на оценку сейсмической опасности двух сейсмоопасных регионов Российской Федерации, а также о важности поставленных в нем задач в глобальном масштабе говорят полученные в ходе работ 2015-2017 гг. результаты. Ниже остановимся на некоторых из них.

1. Были сформулированы принципы системного анализа решения проблемы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений и создана продвинутая версия алгоритмической системы определения высокосейсмичных зон, которая включает элементы искусственного интеллекта и относится к методологии перспективного системного анализа.

2. Были построены схемы морфоструктурного районирования горного Крыма, Керченского полуострова и региона Алтай-Саяны-Прибайкалье. На основе морфоструктурного районирования регионов были выделены объекты

распознавания для решения задачи определения мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений (для магнитуд больше либо равных 4.5; 5.0; 6.0 в регионе Кавказ-Крым и больше либо равных 6.0 для региона Алтай-Саяны-Прибайкалье).

3. На примере Кавказского региона было показано, что данные по литосферным магнитным аномалиям являются информативными с точки зрения определения мест возможного возникновения сильных землетрясений и перспективно их использование при решении подобных задач для других сейсмоактивных регионов.

4. Для регионов Северного Кавказа, Крыма и Алтай-Саяны-Прибайкалье были выполнены оценки сейсмической опасности и сейсмического риска на основе оценки коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений и результатов морфоструктурного распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Для каждого из регионов были построены карты сейсмической опасности в терминах максимальной магнитуды и пикового ускорения на скальном грунте, ожидаемых с вероятностью 10% в период продолжительностью 50 лет, получены оценки повторяемости землетрясений разной силы.

5. Получены оценки сейсмического риска для 18 городов большого Кавказа, 5-ти крупнейших городов Крыма и 11-ти городов региона Алтай-Саяны с населением от 100 тысяч жителей.

Перечисленные результаты были получены исполнителями проекта под руководством Александра Анатольевича. Его собственные научные исследования в рамках выполнения проекта были посвящены разработке реалистичных моделей систем разломов и блоков регионов Кавказа и Алтай-Саяны-Прибайкалье на основе схем морфоструктурного районирования. Численное моделирование динамики и сейсмичности регионов, выполненное Александром Анатольевичем, представлено в виде каталогов синтетических землетрясений. Графики их частотно-магнитудной зависимости сходны с

аналогичным графиком реальной сейсмичности. Модель динамики блоковой структуры Кавказа, созданная Александром Анатольевичем, позволила получить распределение эпицентров искусственных землетрясений, которое во многом воспроизводит реальную сейсмичность. Для территории Алтай-Саяны-Прибайкалье сравнение положений эпицентров сильных искусственных землетрясений с результатами распознавания высокосейсмичных областей региона, выполненное в рамках проекта, показало наличие таких эпицентров в некоторых высокосейсмичных областях, где по данным наблюдений сильных землетрясений до сих пор не происходило.

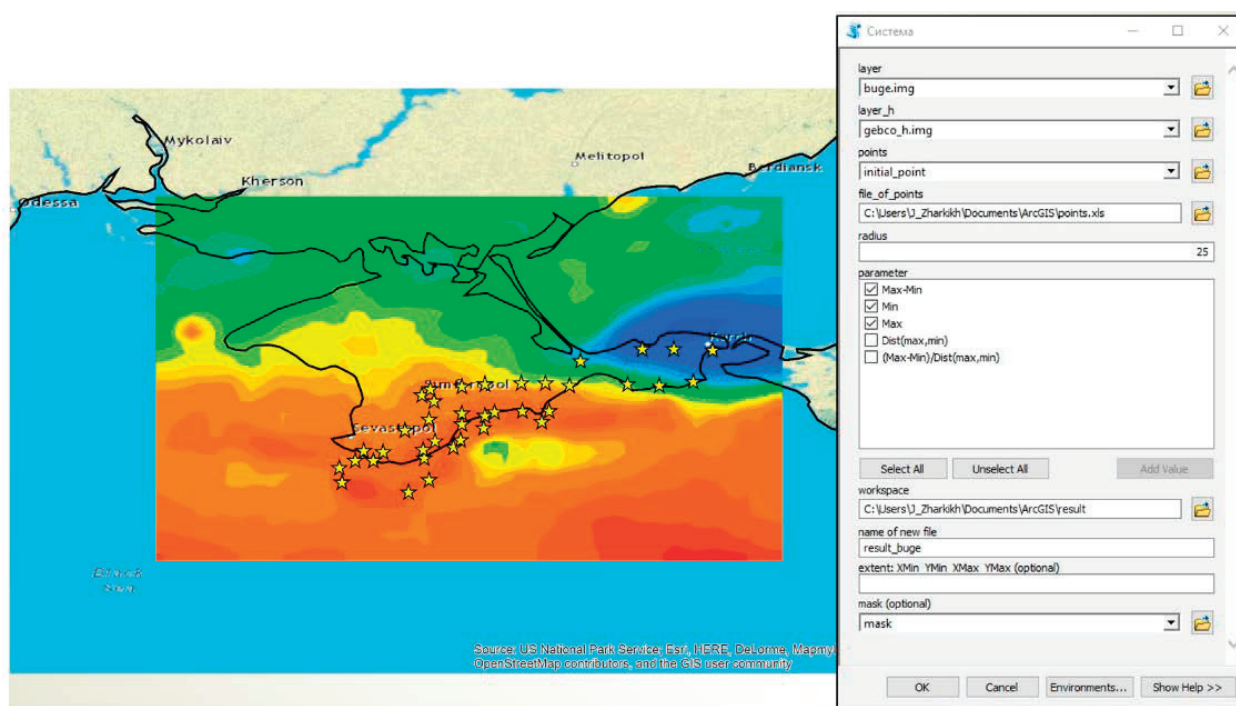
Многие результаты проекта стали доступны для практического использования исследователями, которые занимаются проблемами сейсмической опасности регионов Российской Федерации. В частности, были разработаны инструмент измерения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания (пересечений морфоструктурных линеаментов) для среды ГИС, программа для ЭВМ алгоритма «Барьер», который применим для решения задачи распознавания мест сильных землетрясений, и база данных, сформированная по результатам оценок сейсмической опасности регионов Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье.

Отдельного внимания заслуживает созданная специализированная геоинформационная система, объединяющая упомянутую базу данных и многофункциональный пользовательский интерфейс для работы с ней. Она представляет собой единую среду, в которой впервые были собраны наиболее полные результаты распознавания зон повышенной сейсмичности независимыми методами, а также исходные данные, лежащие в основе распознавания. В этой среде представлены результаты разных, и даже альтернативных, подходов к оценке сейсмической опасности. Таким образом, система дает возможность проведения комплексной, многокритериальной

оценки сейсмической опасности в сейсмоактивных регионах РФ и сопредельных государств. Функционал реализованной ГИС обладает широкими возможностями для анализа и интерпретации полученных результатов. В частности, результаты можно геометрически совмещать и наглядно отображать на интерактивной карте, что дает возможность комплексной оценки сейсмической опасности. Интегрированные в ГИС инструменты для анализа геоданных и интерактивных запросов дают возможность исследователю самостоятельно оценивать степень сейсмической опасности в интересующих регионах по различным критериям на основе различных методов распознавания образов. Это позволяет проводить всестороннее системное изучение сейсмичных регионов и многофакторную оценку рисков.

Некоторые методы распознавания требуют проведения предварительных расчетов по геолого-геофизическим данным в окрестностях заданных точек (например, пересечений морфоструктурных линеаментов). Для этого в ГИС был реализован отдельный инструмент геообработки, позволяющий в интерактивном режиме автоматически определять значения необходимых характеристик из обширной базы исходных геопространственных данных для заданных пользователем окрестностей.

На сегодня система реализована в виде как настольной версии, так и веб-версии с использованием технологии геопорталов (<http://seismgis.gcras.ru/>). Вторая реализация не требует от пользователя никакого специализированного клиентского программного обеспечения, предусматривает централизованное хранилище данных на серверах и дает возможность многопользовательского доступа к системе. Система полностью отвечает требованию масштабируемости как по функциональности, так и по объему данных. Созданная система легла в основу кандидатской диссертации сотрудницы ГЦ РАН (Ю.И. Николовой), принимавшей участие в проекте.



Пример расчета параметров гравитационного поля в окрестностях заданных точек (в данном случае – пересечений линеаментов Крыма; отмечены звездами) заданного радиуса (в данном случае – 25 км): минимальное, максимальное значения и разброс значений аномалий Буге.

Возможность практического использования результатов проекта «Применение системного анализа...» позволяет выполнять мониторинг потенциальных мест возникновения сильных землетрясений и существенно уточнять оценки сейсмической опасности для сейсмоактивных регионов. Наряду с полученными оценками сейсмического риска разработанные сервисы вносят вклад в формирование информационной основы для усовершенствования мер по сокращению ущерба для населения и объектов промышленной инфраструктуры от сейсмических воздействий. Результаты выполнения проекта также вносят вклад в создание условий для адекватного обеспечения градостроительной деятельности в рассмотренных регионах РФ – сейсмостойкого проектирования и строительства объектов разной степени ответственности и сроков эксплуатации, включая инженерные сооружения повышенной опасности, такие как ГЭС, АЭС, химические предприятия, могильники радиоактивных и токсичных отходов и т.п.

ШКОЛЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И КОНФЕРЕНЦИЯ В РАМКАХ ПРОЕКТА

Проект «Применение системного анализа...» ставил целью не только решение научно-исследовательских задач, но и проведение молодежных научных школ и международной конференции.



Академик РАН А.Д. Гвишиани (слева) и чл.-корр. РАН А.А. Соловьев
на Школе молодых ученых «Системный анализ и оценка сейсмической опасности»
в МГУ им М.В. Ломоносова, 2016 г.

Опыт многочисленных школ, которыми Александр Анатольевич руководил в Международном центре теоретической физики им. Абдуса Салама (г.Триест, Италия), был во многом использован для организации двух школ молодых ученых в рамках проекта «Системный анализ ..». Школы молодых ученых были проведены на базе Механико-математического факультета МГУ им М.В. Ломоносова в 2016 г. и Института физики Земли им О.Ю.Шмидта РАН в г. Москве в 2017 г. По мере развития проекта, школы под руководством А.А. Соловьева привлекали все большее число студентов и молодых ученых в возрасте до 35 лет. В 2016 г.их было 29, в 2017 г. –уже 36 человек.



Участники Школы молодых ученых «Системный анализ и оценка сейсмической опасности», Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, 12–15 июля 2016 г.

В число лекторов Школ входили исследователи Геофизического центра РАН, Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, зарубежные коллеги из Университета г. Триеста (Италия), Парижского института физики Земли (Франция), Национального института океанографии и экспериментальной геофизики (г. Триест, Италия), Национального центра космических исследований (г. Париж, Франция), Потсдамского университета (Германия), Эдинбургского университета (Великобритания), Института геофизики и инженерной сейсмологии им. А.Назарова Национальной академии наук Армении (г. Гюмри, Армения).

Некоторые из лекторов являлись представителями руководящих органов международных научных организаций: Профессор Г. Боултон – президент Комитета по данным для науки и техники (CODATA), д-р Хайде Хакманн – исполнительный директор Международного совета по науке (ICSU), д-р А. Исмаил-Заде – генеральный секретарь Международного союза геодезии и геофизики (IUGG). Руководители ведущих российских коллективов в области наук о Земле также выступали с лекциями: директор Геофизического центра РАН, академик А.Д. Гвишиани, директор Института

физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, член-корреспондент РАН С.А. Тихоцкий, директор Единой геофизической службы РАН, член-корреспондент РАН А.А. Маловичко и, конечно, Александр Анатольевич, не только как руководитель проекта и со-председатель программного комитета проводимых школ, но и как директор Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

Обсуждение итогов проекта «Применение системного анализа...» с широким кругом заинтересованных исследователей прошло в рамках международной конференции «Глобальные вызовы и наука, диктуемая данными». Конференция проводилась совместно с Комитетом по данным для науки и техники (CODATA) Международного совета по науке 8-11 октября 2017 г. в г. Санкт-Петербурге. 151 участник конференции представляли 35 стран мира. Многие из них приняли участие в дискуссиях о перспективах практического применения результатов проекта, возможности расширения и дальнейшего развития методов, разработанных в ходе его выполнения. Участие исполнителей проекта в конференции стало итогом трехлетних исследований, которые успешно проводились под руководством Александра Анатольевича Соловьева.



д.ф.-м.н. А.И. Горшков (слева) и чл.-корр. РАН А.А. Соловьев на конференции «Глобальные вызовы и наука, диктуемая данными» в г. Санкт-Петербурге, 2017 г.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ПРОЕКТА «ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ
ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В РЕГИОНАХ
РОССИИ, ВКЛЮЧАЯ КАВКАЗ-КРЫМ И АЛТАЙ-САЯНЫ-
ПРИБАЙКАЛЬЕ»**

Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. № 4. С. 3–23. DOI:10.7868/S0002333716040013.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзедобоев Б.А., Белов И.О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Доклады академии наук. 2017. Т. 474. № 1. С. 86–92. DOI:10.7867/S0869565217130175.

Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Сергеева Н.А., Рыбкина А.И. Формализованная кластеризация и зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений на Крымском полуострове и Северо-Западе Кавказа // Физика Земли. 2017. № 3. С. 33–42. DOI:10.7868/S0002333717030036.

Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Белов И.О., Сергеева Н.А., Вавилин Е.В. Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье-Забайкалье // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 704–710. DOI:10.7868/S0869565217360178.

Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Сергеева Н.А., Белов И.О., Рыбкина А.И. Зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений в регионе Алтай-Саяны // Физика Земли. 2018. № 3. С. 18–28. DOI:10.7868/S000233371803002X.

Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканонология и сейсмология. 2017. № 6. С. 21–27. DOI:10.7868/S0203030617060025.

Горишков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479. № 3. С. 333-335. DOI:10.7868/S0869565218090219.

Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений: Крым и Северный Кавказ // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 470. № 4. С. 468-470. DOI:10.7868/S0869565216280161.

Соловьев Ал.А., Горишков А.И., Соловьев Ан.А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 21-27. DOI:10.7868/S0002333716050148.

Соловьев А.А., Горишков А.И. Моделирование динамики блоковой структуры и сейсмичности Кавказа // Физика Земли. 2017. № 3. С. 3-13. DOI:10.7868/S0002333717030127.

Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Characterizing aftershock sequences of the recent Strong earthquakes in Central Italy // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. № 10. P. 3713-3723. DOI:10.1007/s00024-017-1624-9.

Kossobokov V.G. Testing an earthquake prediction algorithm: The 2016 New Zealand and Chile earthquakes // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. № 5. P. 1845-1854. DOI:10.1007/s00024-017-1543-9.

Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Earthquake hazard and risk assessment based on unified scaling law for earthquakes: Altai–Sayan Region // Natural Hazards. 2018. V. 93. № 3. P. 1435-1449. DOI:10.1007/s11069-018-3359-z.

Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Earthquake hazard and risk assessment based on unified scaling law for earthquakes: Greater Caucasus and Crimea // Journal of Seismology. 2018. V. 22. № 5. P. 1157-1169. DOI:10.1007/s10950-018-9759-4.

Свидетельства о государственной регистрации интеллектуальной собственности, сформированной в ходе выполнения проекта:

Соловьев Ан.А., Соловьев Ал.А., Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К., Горшков А.И., Николова Ю.И., Дзедоев Б.А., Николов Б.П.
ГИС-ориентированная база данных для многокритериальной оценки сейсмической опасности / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621466 от 16 августа 2019 г.

Соловьев Ан.А., Соловьев Ал.А., Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К., Горшков А.И., Николова Ю.И., Дзедоев Б.А., Николов Б.П.
Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в среде ArcGIS / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619517 от 18 июля 2019 г.

Giuliano Francesco Panza

Foreign member RAS; Accademia Nazionale dei Lincei and Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Italy

ALEXANDER SOLOVIEV – A SCIENTIST AND A MAN

I met Alexander Soloviev at the International Centre for Theoretical Physics (ICTP) after my arrival at the University of Trieste, as full Prof. in Geophysics. I had the honor of working with him until the day of his untimely death in 2021. I'll concentrate on the exciting experience of working with him on ICTP research and training projects, as well as the numerous, incredibly enjoyable social gatherings, among which I'd like to specifically note the celebration of Sacha's 50th birthday.



Sacha is saying thanks for his surprise 50th birthday celebration

In 1982, at ICTP, we were successful in luring Academician Prof. Vladimir I. Keilis-Borok. He was a significant geophysical figure, already well-known internationally, and one of the founding fathers of mathematical geophysics working at the Academy of the USSR in Moscow at the time.

Even though communication with our Russian colleagues was more difficult in 1983 than it was, say, before 2023, Prof. Abdus Salam's spirit of international cooperation gave ICTP the push it needed to attempt to forge a formal partnership with Volodya Keilis-Borok and his team, of which Sacha was and continued to be an essential part. Unfortunately, it is not currently likely to achieve something similar.

After much debate, we ultimately decided to hold the Workshop on Pattern Recognition and Analysis of Seismicity at ICTP in 1983.

The Workshop was quite novel for ICTP because we made personal computers (PCs) available through the newly established Informatics Laboratory for the training of participants, with the steadfast backing of Luciano Bertocchi, Deputy Director of ICTP.

The driving force behind this creative and fruitful endeavor has been Sacha Soloviev, aided by few colleagues from Moscow Academy. The participants were divided into small groups and took part in practical exercises for several hours, every day till late evening, supervised Sacha Soloviev and his team. In other instances, the participants were able to use data sets that they brought from their home countries to directly apply the theory that was discussed in the lecture sessions. Motivated participants received copies of the computer codes they had learned to use at the ICTP for implementation and use at their home institution. The workshop's attendees' enthusiastic response suggested that the area of activities for Solid Earth physics should be expanded.

Following a suggestion from the Nobel laureate Abdus Salam, we hosted the Fall Course on Seismology at ICTP in 1986. Co-directed by Bruce Bolt and Alan Cook, it was a logical development of the 1983 Workshop. Keilis-Borok and Soloviev did oversee it in Lima (Peru), with ICTP's support.

In the late eighties, quite remarkable advances were made in the empirical detection of symptoms of instability in the lithosphere of the Earth prior to the occurrence of a strong earthquake. A key role in this respect was played by the USA-USSR research group directed by Frank Press and Leon Knopoff, in the States, and by Keilis-Borok in the USSR. This team of high-level scientists, starting from the data available for California and Nevada, proved empirically that symptoms of instability of the earth lithosphere can be detected in the seismic flow, as described by earthquakes catalogues (quite commonly available for most seismic areas), and they started to look for theoretical models that could give a unique framework for the understanding of the seismogenic process. A quite promising framework for this theoretical research appeared to be the then-developing non-linear dynamics.

Starting from the considerations that the earthquake catalogues are quite easily available data, thanks to the existence of international agencies with the mandated purpose of monitoring the global seismicity, and that the linear-dynamic approach is not able to explain the apparently random occurrence of earthquakes, we felt it particularly important and appropriate for ICTP to offer the possibility to the Earth scientists from developing countries to skip all the unsuccessful approaches and to attempt a direct application of the non-linear dynamics concepts to the intermediate-term earthquake prediction.

We decided to offer our Trainees the most recent developments in seismological theory and computer science, thus allowing them to pass over many avenues of investigation that have proven unsuccessful in industrialized countries. The Fall Course in Seismology was therefore followed by the Workshops on Global Geophysical Informatics with Applications to Research in Earthquake Predictions and Reduction of Seismic Risk, held in 1988 with the co-direction of Keilis-Borok and Knopoff. The 1988 Workshop and all subsequent ones were a great success thanks in large part to the contribution of Sacha Soloviev, who served as both coordinator and software developer. The 1988 workshop allowed

for the further development of the computer lab activity, and the initial core of codes evolved into a friendly package with a broader scope.

The key role occupied by the physical state of the Earth's lithosphere in the seismogenic process convinced us to offer to the interested scientists, as complementary tool for the prediction of earthquakes and of their effects, the most powerful and updated tools for the investigation of the physical properties of the interior of the Earth. For this reason, in 1990, with the co-direction of Anatoly Levshin, formerly Principal Investigator at the International Institute for Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics (IIEPTMG) of the Russian Academy of Science, and, at the time, at the Department of Physics, University of Boulder, Colorado, we organized the Workshop on Earthquake Sources and Regional Lithospheric Structures from Seismic Wave Data.

In 1990, summing up the activities of about ten years, with Abdus Salam and Keilis-Borok we took the important decision to offer more stable training facilities in Structure and Non-linear Dynamics of the Earth and we embarked on the ambitious venture of establishing a Laboratory at the ICTP Galileo building, where research is carried on in very close co-operation with scientists from developing countries. This decision had several motivations including the success of all the workshops held at ICTP and in other countries with ICTP sponsorship, and the large number of applicants that reveals how relevant the interest is in developing countries for the most advanced developments in seismological theory, non-linear dynamics and computer science. Alexander Soloviev has been not only the soul of the laboratory but also the driving force behind the laboratory's establishment and innovations.

In the Laboratory, research is carried out throughout the year, in various fields, including Seismic Risk and Earthquake Prediction, Deterministic Chaos in the Seismogenetic Processes, Computational Seismology and Computer Modeling, Inversion Theory, and Physics of the Earthquake Source. The continuity of the program is ensured not only by Volodya and me, but a major role is played by Sacha in the calendarization, in consultation with Anatoly Levshin, of key

activities, involving distinguished geophysicists, mainly theoreticians, and applied mathematicians. Many scientists, mostly from developing countries and Eastern Europe, are invited for long- or short-term visits; in addition, several ICTP Associates and Affiliates visit the Centre, and many of them actively participate in the research activity of the group.

Research and development projects are divided into the two main lines: (1) non-linear dynamics with application to earthquake prediction, and (2) structure of the Earth. These activities are related to the Project "Intermediate-term Earthquake Prediction", and to the contribution of the International Lithosphere Program (ILP) of the Inter-Union Commission for the Lithosphere (ICL) to the Project "Physical Instability of Megacities" (PIOM), formulated by the International Council of Scientific Unions (ICSU) for the United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR). These initiatives, as suggested by IDNDR, focus on prevention and preparedness for natural disasters rather than the after-the-fact response that has characterized most of the undoubtedly unsuccessful activities conducted up to this point. Prediction of the spectral content of the earthquake ground motion recorded in Amatrice on October 30, 2016, as shown below, is an illustration of the potential to create preventive modeling. The basis of our earthquake prediction work is the set of new possibilities for the study of the dynamics and structure of the solid Earth. These possibilities are based on the adaptation of the methods developed in theoretical physics and mathematics, specifically in non-linear dynamics, wave propagation realistic modeling, theory of inversion, and pattern recognition. Our experience in geophysics opens a new approach to the important and most difficult part of non-linear dynamics: the predictability of non-linear systems with an "intermediate" number of degrees of freedom. We model the lithosphere's behavior by using numerical models and differential equations, we determine the symptoms of instability of the lithosphere and the role of heterogeneous scale processes which control lithosphere dynamics, and we define the unknown parameters of the models by direct and inverse methods using real data.

These new ideas are applied to the development of earthquake prediction algorithms. The hierarchical time-space structure of the zone of strong earthquake preparation is investigated. Several months before the occurrence of a strong earthquake, local space redistribution of seismicity is observed near the epicenter. The preliminary results indicate the possibility of creating a new earthquake prediction algorithm, which we hope will give better space localization of future, strong earthquakes. Two types of models are under investigation: dynamics and structure of systems of movable, interacting discs, and the multiscale cellular automata model of the kinematics of the development of cracks. These models are successfully developed on personal computers with graphic representation of the results in collaboration with researchers from the IIEPTMG in Moscow, under the guidance of Sacha. Both models can produce data sets of unlimited length, which are like earthquake catalogues. These data sets can be used for the evaluation of earthquake prediction algorithms (for more details see <http://www.mitp.ru/en/index.html> and <http://www.mitp.ru/en/cn/CN-Italy.html>).

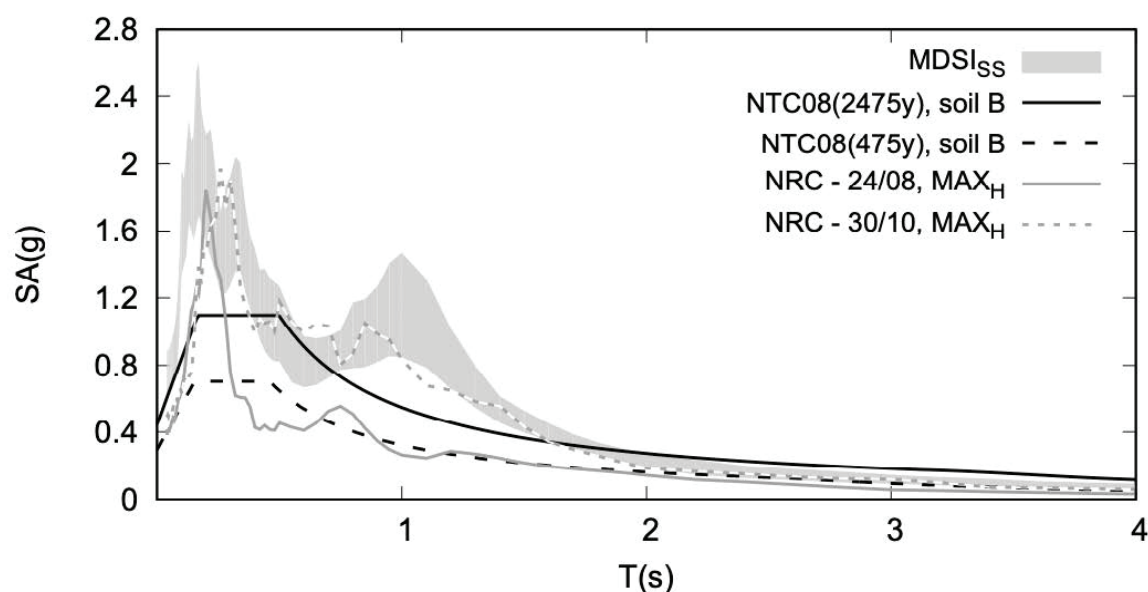
Complementary to earthquake prediction, we attempt the improvement of the methods for the detection of active lineaments, and of the evaluation of the mobility of their different segments. This research is done in collaboration with the University of Trieste. The method provides the definition of active blocks of the Earth and the specification of the possible maximum magnitude for their earthquakes.

To carry out the work under the research line Structure of the Earth, we developed a Task Group in 1991 with Fred Schwab, of the University of California at Los Angeles. We then obtained international sanction to operate as the ILP Task Group II-4 “Three-Dimensional Modeling of the Earth’s Tectosphere” (3DMET). In accordance with the United Nations’ mandate to ICTP, our Group is composed principally of scientists from developing countries. The size of the Task Group: approximately 140 researchers at 40 local centres in 23 different countries, allows us to carry on its two, large-scale activities simultaneously.

At the 20th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), held in Vienna, in 1991, the activities of our Task Group II-4 were expanded when it became an ILP contribution to the IDNDR within the PIOM program of ICSU. With our project results for the highest possible resolution of the 3-D structure of the Earth, and seismic sources, practical applications of the highest importance become possible. *There is first the possibility of immediate global reduction of loss of human life and property damage caused by earthquakes*, and this is our contribution to the PIOM Project. The specific purpose is the theoretical computation of highly detailed, local ground motion and related intensities throughout seismically active regions. Our means of using this procedure to reduce loss of life and property damage is by immediate computation of the ground motion associated with destructive earthquakes, at an arbitrarily dense set of sites throughout a given area.

The most important scientific result for the ILP project 3DMET is the realization of the primary importance of the detailed specifications and design of the database that defines the 3-D structure of the lithosphere and asthenosphere. The first 3DMET regional meeting, partly supported by ICTP and TWAS, took place in Chengdu, China (September 1993). The success of the meeting was largely due to the efforts of Prof. Zhu Jieshou of Chengdu Institute of Technology.

To map highly accurate seismic ground motion and related intensities in active areas, we therefore need not to wait for earthquakes to occur in likely focal regions, and then to be measured at specific points of interest on the surface; instead, with the knowledge of accurate three-dimensional structures and probable source mechanisms, we can immediately compute seismograms at all sites of interest. The structural database, and hence theoretical seismograms can then be updated continuously by comparison with incoming, new experimental data. As mentioned, an outstanding, recent result obtained from the natural evolution of the methods developed in our ILP contribution to the IDNDR, within the PIOM program of ICSU, is the prediction of the spectral content of earthquake ground motion recorded in Norcia October 30, 2016 (gray band in the following figure):



Comparison between (a) observed Spectral Acceleration (SA) at NRC station (events of 24/08/2016 and 30/10/2016), (b) NTC08 spectrum (i) for soil B at the same site (dark lines) and (ii) for local structure (grey area that corresponds to the values between median and 95th percentile). For more details see *J. Earthquake and Impact Engineering, Vol. 1, No. 4, 2016*

The earthquake-generating lithosphere (upper shell of the solid Earth) is now regarded as a hierarchical, non-linear, dissipative system, and earthquakes are regarded as critical transitions in the system. Accordingly, the methods of non-linear dynamics that have been developed in theoretical physics, chemistry and biology, as well as in formal mathematics, can be used. Distinctive features of the lithosphere, considered as a non-linear system, are (1) that it remains in a subcritical state, even after the large discharge of energy associated with the occurrence of a strong earthquake (a self-organized criticality), (2) that it has an "intermediate" number of degrees of freedom, and possibly (3) that it features a relatively new type of phase transitions, such as that discovered by Ya. Zeldovich in astrophysics.

The main result of the analysis, in the time-space-magnitude domain, of the scale-invariant and fractal properties of earthquake sequences allows us to prove that some fractal object may be a monofractal, and simultaneously a multifractal with non-trivial spectrum. This result could also be of general interest for the understanding of the scaling of natural objects. In addition, we have found that simple models of the cellular automata type reproduce many observed,

premonitory seismicity patterns. This justifies and indicates the use of these models in the research on earthquake prediction.

For a system of interacting blocks, the modeling performed has shown: (1) an integral measure of the tendency toward fractal fracturing, that we named "geometric incompatibility", (2) an analogue of Stokes formula, allowing us to determine this measure for an area if we know the movements on its boundary, and (3) symptoms of instability that are hypothetically universal. The testing of these symptoms has been successfully carried out thanks also to the key continuous contribution of Sacha.

Now, to soften the atmosphere of this scientific commemoration veiled by inevitable sadness, I like to recall here the warm, friendly atmosphere at the Fourth Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction held, 6 - 24 October 1997, when we celebrated the 50th anniversary of Sacha, born October 21. We could not lose the occasion to express all our appreciation for him both as a scientist and as gentlemen. Larissa, the caring wife always by Sacha's side lead the organization of the event, but exceptionally on this occasion she is sitting on my side, for symmetry reason, since Rita is close to Sacha. But in a following photo order is restored!



From left to right: A.Egorkin, Yu. Melnikov, I.Vorobieva, V.Rozenberg, L.Solovieva, G.Panza,
V.Keilis-Borok, A.Soloviev, R.Panza



From left to right: A. Soloviev, L.Solovieva, R. Panza, G.Panza



From left to right: V. Keilis-Borok, V. Rozenberg, G. Molchan, T. Kronrod, A. Gorshkov, A. Soloviev

Yet, we also had a lot of other chances to have fun with Larissa and Sacha, especially in the evenings when we would talk about, among other things, our knowledge of Italian and Russian cuisine. We got particularly interesting, new, and tasty the way Sacha used to dress fresh salmon with salt and sugar and aromas that he revealed to us. At that time in Italy only smoked salmon was popular and Rita and I did not like it; the recipe we learned from Sacha made us fun of salmon, still now! Every so often I repeat the preparation process learned from Sacha; Rita and I like to share the product with our neighbors, with great success.

The main achievements for which the contribution of Sacha was fundamental can be summarized as follows. The development and testing of algorithms for earthquake prediction has entered a new phase: it is focused on the synthesis of mathematical modeling and geophysical phenomenology. Algorithm CN, for intermediate-term earthquake prediction, has been significantly improved introducing the use of new seismotectonic regionalization and the analysis of spatial redistribution of background seismicity.

The study of the statistical properties of the seismicity associated with the India-Eurasia plate collision zone led us to the discovery of new aspects in the geometry of the collision zone. Instead of the traditional assumption of a convection cell beneath the Himalayan arc, having movement orthogonal to the arc, the new statistics shows some evidence of the existence of two cone-type cells; these cells are at the western and eastern ends of the Himalayas, and are in different stages of maturity. The western cell could also solve the "mystery" of the origin of the Pamir-Hindu Kush seismicity of intermediate depth. Always dealing with intermediate-depth seismicity, in the framework of a quite fruitful trilateral co-operation established with the Romanian and Russian scientists, the existing intermediate-term techniques for earthquake prediction has been successfully applied to the Circum-Pannonian area, and in particular, to the Vrancea region. Here the strongest earthquakes occur, and the high seismic activity makes particularly urgent the reliable seismic hazard assessment of two nuclear power

stations, Cernavoda (Romania) and Kozloduy (Bulgaria), whose distance from Vrancea are of about 100 km and 200 km, respectively.

A common feature to all the projects carried out in Physics of the Solid Earth is the publication of the most important results in many of the most prestigious international scientific journals and Sacha occupies a relevant rank among Authors. The collaboration with Alexander Soloviev continued practically up to the day of his untimely death, and his seminal contribution will undoubtedly inspire future critical research aimed at reducing the likelihood of natural disasters and providing guidelines for the safe planning of industrial and urban areas.

Перевод (П.Д. Щепалина)

Дж.Ф. Панца

АЛЕКСАНДР СОЛОВЬЕВ – УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК

С Александром Соловьевым я познакомился в Международном центре теоретической физики (ICTP) после моего прибытия в Университет Триеста в качестве профессора геофизики. Я имел честь работать с ним до дня его безвременной кончины в 2021 году. Я сосредоточусь на захватывающем опыте работы с ним над исследовательскими и образовательными проектами ICTP, а также на многочисленных невероятно приятных общественных мероприятиях, среди которых особо хочу отметить празднование 50-летия Саши.

В 1982 году нам удалось привлечь в ICTP академика профессора Владимира Исааковича Кейлиса-Борока. Он был выдающимся геофизическим деятелем, уже известным за рубежом, и одним из основоположников математической геофизики, работавшим в то время в Академии наук СССР в Москве.

Несмотря на то, что общение с нашими российскими коллегами в 1983 году было труднее, чем, скажем, до 2023 года, дух международного сотрудничества профессора Абдуса Салама дал ICTP толчок, необходимый для попытки наладить официальное партнерство с Володей Кейлис-Борком и его командой, важной частью которого был и остается Саша. К сожалению, в настоящее время вряд ли удастся достичь чего-то подобного.

После долгих споров мы в конечном итоге решили провести школу по распознаванию образов и анализу сейсмичности в ICTP в 1983 году.

Школа была совершенно новым делом для ICTP, но как раз в это время для обучения участников стали доступны персональные компьютеры (ПК) через недавно созданную Лабораторию информатики при неизменной поддержке Лучано Берточки, заместителя директора ICTP.

Движущей силой этого творческого и плодотворного начинания стал Саша Соловьев, которому помогали несколько коллег из Москвы. Участники были разбиты на небольшие группы и по несколько часов ежедневно до позднего вечера принимали участие в практических занятиях под руководством Саши Соловьева и его команды. В других случаях участники смогли использовать наборы данных, которые они привезли из своих стран, для непосредственного применения теории, обсуждавшейся на лекционных занятиях. Заинтересованные участники получили копии компьютерных программ, которые они научились использовать в ИСТР, для внедрения и использования в своем учреждении. Восторженные отклики участников семинара свидетельствовали о необходимости расширения сферы деятельности по физике твердой Земли. По предложению нобелевского лауреата Абдуса Салама в 1986 году мы провели в ИСТР осенний курс по сейсмологии. Под со-руководством Брюса Болта и Алана Кука этот семинар стал логическим развитием семинара 1983 года. Кейлис-Борок и Соловьев провели такую школу в Лиме (Перу) при поддержке ИСТР.

В конце восьмидесятых годов были достигнуты весьма заметные успехи в эмпирическом выявлении симптомов нестабильности литосферы Земли перед возникновением сильного землетрясения. Ключевую роль в этом сыграла исследовательская группа США-СССР под руководством Фрэнка Пресса и Леона Кнопоффа в США и Кейлиса-Борока в СССР. Эта группа учёных высокого уровня, исходя из имеющихся данных по Калифорнии и Неваде, эмпирически доказала, что симптомы нестабильности земной литосферы могут быть обнаружены в сейсмическом потоке, описываемом каталогом землетрясений (вполне доступных для большинства сейсмических районов), и они начали искать теоретические модели, которые могли бы дать уникальную основу для понимания сейсмогенного процесса.

Весьма многообещающей основой для этого теоретического исследования оказалась развивавшаяся в то время нелинейная динамика. Исходя из соображений, что каталоги землетрясений представляют собой

довольно легкодоступные данные благодаря существованию международных агентств, уполномоченных осуществлять мониторинг глобальной сейсмичности, и что линейно-динамический подход не способен объяснить кажущееся случайное возникновение землетрясений, мы сочли особенно важным и уместным, чтобы ИСТР предложил ученым из развивающихся стран возможность пропустить все неудачные подходы и попытаться напрямую применить концепции нелинейной динамики к среднесрочному прогнозированию землетрясений.

Мы решили предложить нашим стажерам самые последние разработки в области сейсмологической теории и информатики, что позволило им обойти многие направления исследований, которые оказались безуспешными в промышленно развитых странах. Поэтому за осенним курсом сейсмологии последовали школы по глобальной геофизической информатике с ее применением в исследованиях по прогнозированию землетрясений и снижению сейсмического риска, проведенные в 1988 году под совместным руководством Кейлис-Борок и Кнопофф.

Школа 1988 года и все последующие имели большой успех во многом благодаря вкладу Саши Соловьева, который был одновременно координатором и разработчиком программного обеспечения. Школа 1988 года позволила продолжить работу в компьютерных лабораториях, и первоначальный набор программ превратился в удобный пакет с более широкими возможностями.

Ключевая роль, которую играет физическое состояние литосферы Земли в сейсмогенном процессе, убедила нас предложить заинтересованным ученым, как дополнительный инструмент для прогнозирования землетрясений и их последствий, наиболее мощный и современный инструмент для исследования физических свойств недр Земли. По этой причине в 1990 году под руководством Анатолия Левшина, сотрудника Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (МИТПАН), а в то время сотрудника

Отделения Физики Университета Боулдера, штат Колорадо, мы организовали школу по изучению очагов землетрясений и региональных литосферных структур по данным о сейсмических волнах.

В 1990 году, подводя итоги десятилетней деятельности, мы вместе с Абдусом Саламом и Кейлис-Бороком приняли важное решение предложить более стационарное учебное заведение по структуре и нелинейной динамике Земли и приступили к амбициозному предпринятию по созданию Лаборатории в ИСТР в здании «Галилео», где исследования проводились в очень тесном сотрудничестве с учеными из развивающихся стран. Это решение было мотивировано несколькими причинами, включая успех всех школ, проводимых в ИСТР и в других странах, спонсируемых ИСТР, а также большое количество заявок, что показывает, насколько актуален интерес развивающихся стран к наиболее передовым разработкам в области сейсмологической теории, нелинейной динамики и компьютерным наукам. Александр Соловьев был не только душой лаборатории, но и движущей силой ее создания и инноваций.

В лаборатории ежегодно проводились исследования в различных областях, включая сейсмический риск и прогнозирование землетрясений, детерминированный хаос в сейсмогенных процессах, вычислительную сейсмологию и компьютерное моделирование, теорию инверсии и физику очага землетрясений. Непрерывность программы обеспечивали не только мы с Володей, но главную роль в программе играл Саша по календаризации, по согласованию с Анатолием Левшиным, ключевых направлений деятельности с привлечением выдающихся геофизиков, главным образом теоретиков, и математиков-прикладников. Многие ученые, в основном из развивающихся стран и Восточной Европы, приглашались для долгосрочных или краткосрочных визитов; кроме того, Центр посещали несколько ассоциированных членов и филиалов ИСТР, и многие из них активно участвовали в исследовательской деятельности группы.

Проекты исследований были разделены на два основных направления: (1) нелинейная динамика с применением к прогнозу землетрясений и (2) структура Земли. Данная деятельность была связана с проектом «Среднесрочный прогноз землетрясений», а также с вкладом Международной литосферной программы (ILP) Межсоюзной комиссии по литосфере (ICL) в проект «Физическая нестабильность мегаполисов» (ПИОМ), сформулированный Международным советом научных союзов (ICSU) для Международного десятилетия ООН по уменьшению опасности стихийных бедствий (IDNDR). Эти инициативы, как предлагает IDNDR, сосредоточены на предотвращении и подготовке к стихийным бедствиям, а не на реагировании постфактум, которое характеризовало большинство несомненно безуспешных мероприятий, проводившихся до сих пор. Прогноз спектрального состава движения грунта при землетрясении, зарегистрированном в Аматриче 30 октября 2016 г., как показано ниже, является иллюстрацией потенциала создания превентивного моделирования. В основе нашей работы по прогнозированию землетрясений лежит комплекс новых возможностей изучения динамики и структуры твердой Земли. Эти возможности основаны на адаптации методов, разработанных в теоретической физике и математике, в частности в нелинейной динамике, реалистическом моделировании распространения волн, теории инверсии и распознавании образов. Наш опыт в геофизике открывает новый подход к важной и самой сложной части нелинейной динамики: предсказуемости нелинейных систем с «промежуточным» числом степеней свободы. Мы моделируем поведение литосферы с помощью численных моделей и дифференциальных уравнений, определяем симптомы нестабильности литосферы и роль гетерогенно-масштабных процессов, управляющих динамикой литосферы, а также определяем неизвестные параметры моделей прямыми и обратными методами с использованием реальных данных.

Эти новые идеи применяются при разработке алгоритмов прогноза землетрясений. Исследована иерархическая пространственно-временная

структура зоны подготовки сильного землетрясения. За несколько месяцев до возникновения сильного землетрясения вблизи эпицентра наблюдается локальное пространственное перераспределение сейсмичности. Предварительные результаты указывают на возможность создания нового алгоритма прогноза землетрясений, который, как мы надеемся, позволит лучше локализовать будущие сильные землетрясения в пространстве. Исследуются два типа моделей: динамика и структура систем подвижных взаимодействующих дисков и многомасштабная клеточно-автоматная модель кинематики развития трещин. Эти модели успешно разрабатываются на персональных компьютерах с графическим представлением результатов в сотрудничестве с исследователями ИТПЗ в Москве под руководством Саши. Обе модели могут создавать наборы данных неограниченной длины, похожие на каталоги землетрясений. Эти наборы данных могут быть использованы для оценки алгоритмов прогноза землетрясений (подробнее см. <http://www.mitp.ru/en/index.html> и <http://www.mitp.ru/en/cn/CN-Italy.html>). В дополнение к прогнозу землетрясений мы пытаемся усовершенствовать методы обнаружения активных линейментов и оценки подвижности их различных сегментов. Это исследование проводится в сотрудничестве с Университетом Триеста. Метод обеспечивает определение активных блоков Земли и уточнение возможных максимальных магнитуд землетрясений.

Для выполнения работы в рамках исследовательского направления «Структура Земли» в 1991 году мы создали рабочую группу вместе с Фредом Швабом из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Затем мы получили международное разрешение на работу в качестве Целевой группы ILP II-4 «Трехмерное моделирование тектоносферы Земли» (3DMET). В соответствии с мандатом Организации Объединенных Наций для ISPT, наша группа состоит в основном из ученых из развивающихся стран. Состав рабочей группы: около 140 исследователей в 40 местных центрах в 23 разных странах, позволяет нам одновременно работать в двух крупномасштабных направлениях. На 20-й Генеральной ассамблее Международного союза

геодезии и геофизики (IUGG), состоявшейся в Вене в 1991 году, деятельность нашей целевой группы П-4 была расширена, ее деятельность стала вкладом ILP в IDNDR в рамках программы PIOM ICSU. Благодаря результатам нашего проекта по максимально возможному разрешению трехмерной структуры Земли и сейсмическим источникам становятся возможными важнейшие практические применения. Во-первых, возникает возможность немедленного глобального сокращения человеческих жертв и материального ущерба, вызванного землетрясениями, и это наш вклад в проект PIOM. Конкретной целью является теоретический расчет детализированных локальных движений грунта и связанных с ними интенсивностей в сейсмически активных регионах. Наш способ использования этой процедуры для уменьшения человеческих жертв и материального ущерба заключается в оперативном вычислении движения грунта, связанного с разрушительными землетрясениями, в произвольно плотном наборе площадок на заданной территории. Важнейшим научным результатом проекта ILP 3DMET является осознание первостепенной важности детальных спецификаций и создание базы данных, определяющей трехмерную структуру литосферы и астеносферы. Первое региональное совещание 3DMET, частично при поддержке ICTP и TWAS состоялось в Чэнду, Китай (сентябрь 1993 г.). Успех встречи во многом стал возможен благодаря усилиям профессора Чжу Цзешоу из Технологического института Чэнду. Поэтому, чтобы составить точную карту сейсмического движения грунта и связанной с ним интенсивности в активных областях, нам не нужно ждать, пока землетрясения произойдут в вероятных очаговых регионах, а затем проводить измерения в конкретных точках на поверхности; вместо этого, зная точные трехмерные структуры и механизмы вероятных источников, мы можем немедленно рассчитать сейсмограммы на всех интересующих участках. Структурная база данных и, следовательно, теоретические сейсмограммы могут затем постоянно обновляться путем сравнения с поступающими новыми экспериментальными данными. Как уже

упоминалось, выдающимся недавним результатом, полученным в результате естественного развития методов, разработанных в рамках нашего вклада ILP в IDNDR в рамках программы PIOM ICSU, является предсказание спектрального состава движения грунта при землетрясении, зарегистрированном в Норсии 30 октября 2016 года (см. рисунок).

Генерирующая землетрясения литосфера (верхняя оболочка твердой Земли) в настоящее время рассматривается как иерархическая, нелинейная, диссипативная система, а землетрясения рассматриваются как критические переходы в системе. Соответственно, могут быть использованы методы нелинейной динамики, разработанные в теоретической физике, химии и биологии, а также в формальной математике. Отличительными особенностями литосферы, рассматриваемой как нелинейная система, являются: (1) то, что она остается в докритическом состоянии даже после большого выброса энергии, связанного с возникновением сильного землетрясения (самоорганизованная критичность), (2) что она имеет «промежуточное» число степеней свободы и, возможно, (3) что она имеет относительно новый тип фазовых переходов, например, открытый Я.Зельдовичем в астрофизике. Основным результатом анализа по времени-пространству-магнитуде масштабно-инвариантных и фрактальных свойств последовательностей землетрясений позволяет доказать, что некоторый фрактальный объект может быть монофракталом и одновременно мультифракталом с нетривиальным спектром. Этот результат также может представлять общий интерес для понимания масштабирования природных объектов. Кроме того, мы обнаружили, что простые модели типа клеточных автоматов воспроизводят многие наблюдаемые предвестники сейсмичности. Это оправдывает и указывает на использование данных моделей в исследованиях по прогнозу землетрясений. Проведенное моделирование для системы взаимодействующих блоков показало: (1) интегральную меру тенденции к фрактальному разрушению, которую мы назвали «геометрической несовместимостью», (2) аналог формулы Стокса,

позволяющий определить эту меру для области, если мы знаем движения на ее границе, и (3) симптомы неустойчивости, которые гипотетически универсальны. Тестирование этих симптомов было успешно проведено, в том числе, благодаря постоянному вкладу Саши.

Теперь, чтобы смягчить атмосферу этого научного торжества, окутанного неизбежной грустью, мне хотелось бы вспомнить теплую, дружескую атмосферу на четвертой школе по нелинейной динамике и прогнозу землетрясений, проходившей 6-24 октября 1997 г., когда мы отмечали 50-летний юбилей Саши, родившегося 21 октября. Мы не могли упустить случая выразить ему всю нашу признательность и как учёному, и как джентльмену. Лариса, заботливая жена, всегда рядом с Сашей, руководит организацией мероприятия, но в исключительном случае она сидит рядом со мной, из соображений симметрии, поскольку Рита близка Саше. Но на следующем фото порядок восстановлен!

Но у нас было и много других возможностей развлечься с Ларисой и Сашей, особенно по вечерам, когда мы говорили, помимо прочего, о наших знаниях итальянской и русской кухни. Особенно интересно, ново и вкусно было для нас с Ритой увидеть, как Саша заправлял свежего лосося солью, сахаром и ароматами. В то время в Италии был популярен только копченый лосось, и нам с Ритой он не нравился; рецепт, который мы узнали от Саши, сделал нас фанатами лосося до сих пор! Время от времени я повторяю процесс подготовки, которому научился у Саши. Нам с Ритой нравится делиться этим продуктом с нашими соседями, и мы с большим успехом это делаем.

Основные достижения, в которых вклад Саши был основополагающим, можно резюмировать следующим образом. Разработка и апробация алгоритмов прогноза землетрясений вступила в новый этап: она ориентирована на синтез математического моделирования и геофизической феноменологии. Алгоритм CN для среднесрочного прогноза землетрясений был существенно усовершенствован за счет использования новых методов

сеймотектонического районирования и анализа пространственного перераспределения фоновой сейсмичности. Изучение статистических свойств сейсмичности, связанной с зоной столкновения Индийской и Евразийской плит, привело нас к открытию новых аспектов геометрии зоны столкновения. Вместо традиционного предположения о наличии конвекционной ячейки под Гималайской дугой, движущейся ортогонально дуге, новая статистика показывает некоторые свидетельства существования двух ячеек конусного типа; эти клетки находятся на западной и восточной окраинах Гималаев и находятся на разных стадиях зрелости. Западная ячейка также могла бы разгадать «загадку» происхождения средне-фокусной сейсмичности Памиро-Гиндукуша.

Постоянно занимаясь средне-фокусной сейсмичностью, в рамках весьма плодотворного трехстороннего сотрудничества между итальянскими, румынскими и российскими учеными, существующие среднесрочные методы прогноза землетрясений были успешно применены к Циркум-Паннонскому региону и, в частности, к региону Вранча. Здесь происходят сильнейшие землетрясения, а высокая сейсмическая активность делает особенно актуальной надежную оценку сейсмической опасности двух атомных электростанций - Чернавода (Румыния) и Козлодуй (Болгария), расстояние которых от Вранчи составляет около 100 км и 200 км соответственно.

Общей чертой всех материалов, публикуемых в журнале «Физика Земли», где Саша был членом редколлегии и постоянным автором, является их высокий научный уровень. Сотрудничество с Александром Соловьевым продолжалось практически до дня его безвременной кончины, и его плодотворный вклад, несомненно, вдохновит будущие исследования, направленные на предотвращение ущерба от стихийных бедствий и предоставление рекомендаций по безопасному планированию промышленных и городских территорий.

Академик РАН А.Д. Гвишиани
Геофизический центр РАН

ПРО МОЕГО ДРУГА САШУ СОЛОВЬЁВА

Мы встретились и сразу подружились с Сашей Соловьёвым на мехмате МГУ им М.В. Ломоносова в 1966 году, только что ставши студентами первого курса. Встреча оказалась, в определенной степени, судьбоносной для нас обоих.

Саша был одним из лучших студентов нашего курса и учился только на пятёрки. Одновременно, он оказался весёлым, коммуникабельным и компанейским парнем, обладающим харизмой и чувством юмора. Парадигма действий отражала Сашину активную жизненную позицию, которую он характеризовал как то, что «общий настрой должен быть мажорный». Этим привлекательным чувством удовольствия от каждого прожитого дня, от общения с друзьями, да и от жизни вообще, Саша щедро делился с окружающими. Притягивающий оптимизм он сохранил на долгие годы. Саша оставался таким и в последние годы своей жизни, когда его здоровье заметно ухудшилось.

Член-корреспондент Отделения наук о Земле РАН, доктор физико-математических наук Александр Анатольевич Соловьёв ушел из жизни 23 сентября 2021 года. Он был похоронен в Москве на Троекуровском кладбище, где покоятся останки выдающихся учёных, государственных деятелей, крупных военачальников, известных работников культуры и искусства.

Последний раз я встретил моего друга за два месяца до этого. Саша и его жена Лариса пришли к нам в гости поздравить мою жену Наташу с днём рождения. Мы четверо часто встречались и дружили более 50 лет.

Тогда, 29 июня 2021 года, Саша был уже не в лучшей форме, но это никак не ощущалось окружающими. Он, как всегда, широко улыбался,

оживленно беседовал и шутил с окружающими. Сказал тёплый тост в адрес Наташи. Сашин, как положено, «мажорный» настрой не давал повода предположить, что это наша последняя встреча.

К сожалению, это оказалось так. Он остался в памяти, как обычно, гладко выбритым, в очках, в элегантном летнем костюме, высоким, поджарым мужчиной, говоря о котором язык не поворачивался назвать его пожилым. Саше шёл семьдесят четвёртый год. Прошедшая долгий жизненный путь вместе с мужем Лариса гармонично дополняла их запоминающуюся пару. Александр Анатольевич Соловьёв запомнился гостям того вечера как известный, состоявшийся орденоносный учёный-геофизик, который и выглядел соответствующим образом.

Наши с Сашей жизненные пути часто и плотно пересекались. В 1976 году я был приглашен из МГУ им. Ломоносова в Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта АН СССР (ИФЗ) в качестве заведующего создаваемой лабораторией, в задачи которой впервые вошло развитие геофизических банков данных. Я сразу пригласил перейти в лабораторию и Сашу. Тогда, несколько лет после окончания университета, он работал в Институте проблем управления АН СССР, где занимался весьма перспективной темой. Ни минуты не колеблясь Саша принял моё приглашение, погрузившись, буквально на следующий день, в совершенно новую для него (да и для меня) науку – геофизику. Такое оперативное решение было характерным для Саши – он умел распознавать перспективные направления исследований и концентрироваться на них в полной мере, не слишком сожалея о том, что оставалось в прошлом.

Траектории нашего движения вперёд совпадали на длительные периоды. Работая много лет (1975-1988 гг.) вместе в Институте физики Земли имени О.Ю. Шмидта мы двигались к единой цели, создавая эксклюзивную лабораторию системного накопления и математического анализа данных в

секторе вычислительной геофизики ИФЗ. Это были эффективные и продуктивные годы нашей совместной работы с Сашей. Мы работали под руководством выдающихся советских учёных академиков АН СССР А.В. Сидоренко, А.Л. Яншина, М.А. Садовского, И.Ф. Образцова и др. Саша сразу заработал высокий научный и человеческий авторитет у наших сотрудников и стал одним из лидеров лаборатории.

Наша лаборатория, со временем, стала эффективной и передовой частью ИФЗ. Мы внесли существенный вклад в целый ряд важных проектов института и Академии наук СССР в целом, которые имели государственную важность и выполнялись по прямым распоряжениям Правительства. Среди таких проектов – исследование эпицентральной зоны разрушений Спитакского (Ленинаканского) землетрясения 7 декабря 1988 года в Армении. Оценка понесённого ущерба проводилась, по личному распоряжению председателя правительственной комиссии Н.И. Рыжкова (глава советского Правительства в то время), совместно с геофизиками из целого ряда зарубежных институтов.

Данные собирались в эпицентральной зоне, а накапливались и обрабатывались - в Москве. Вместе со старшими научными сотрудниками лаборатории А.В. Елютиным и А.И. Горшковым я находился в эпицентральной зоне в Армении. Саша координировал обработку информации в институте в Москве. Как и в любые другие моменты, результаты его работы были исключительно профессиональными и качественными.

С удовольствием вспоминаю прекрасное время молодости и нашу общую работу с Сашей над множеством разных дел и проектов. Ярko запомнились наши совместные командировки в разные близкие и далёкие точки СССР и за границу. Александр Анатольевич Соловьёв внёс существенный вклад в развёртывание международного сотрудничества ИФЗ

со многими странами: Германской Демократической Республикой, Италией, Францией, США, Перу. Он активно участвовал в международной геофизической жизни, систематически выступая с докладами на ассамблеях Международного Геодезического и Геофизического Союза, Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли, Европейской сейсмологической комиссии.

Все, что делал Саша, он старался сделать как можно лучше. Почти 20 лет он работал директором Института теории прогноза землетрясений РАН. Я не встречал и, думаю, что и не встречу директора, который лично контролировал так много деталей. Это же относится к Саше и как к учёному. Оптимизируя сохранность используемых данных, он ежедневно копировал содержимое своего ноутбука на внешние носители.

Александр Анатольевич и Лариса Михайловна Соловьёвы создали замечательную семью. Они вырастили двух достойных сыновей, которым дали имена их дедов - Михаил и Анатолий. Оба сына, как и Саша, получили математическое образование. Старший сын Михаил стал продвинутым IT-специалистом, сделавшим успешную карьеру в банковском секторе.

Младший сын член-корреспондент РАН Анатолий Александрович Соловьёв пошёл по стопам отца и стал учёным-геофизиком. Сегодня – он научный лидер в области изучения геомагнетизма в нашей стране. В 2018 году Анатолий был избран директором Геофизического центра РАН. Как научный руководитель этого института я, как и более 40 лет назад, работаю в тесном рабочем и дружеском контакте с Соловьёвым, теперь уже с Анатолием Александровичем – достойным преемником своего выдающегося отца. Мы с Толей часто вспоминаем его папу и моего друга Сашу Соловьёва добрым словом.



Слева – академик РАН Алексей Джерменович Гвишиани, справа – член-корреспондент РАН Александр Анатольевич Соловьев. Июль 2016г., Школа молодых ученых «Системный анализ и оценка сейсмической опасности» в МГУ им М.В. Ломоносова



Июнь 2019 г.

Чл.-корр. РАН П.Н. Шебалин

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

А.А. СОЛОВЬЕВ КАК НАЧАЛЬНИК И КАК СОАВТОР

С Александром Анатольевичем мне довелось работать в течение 40 лет. В 1981 г. после окончания МГУ и службы в армии я пришел в лабораторию прикладной математики отдела вычислительной геофизики ИФЗ АН СССР. А.А. Соловьев тогда был заместителем заведующего лабораторией, а руководил ей Алексей Джерменович Гвишиани. Одним из направлений в лаборатории был Банк геофизических данных по прогнозу землетрясений. Первая моя статья как сотрудника лаборатории, в соавторстве с А.Д. Гвишиани, А.А. Соловьевым и А.А. Мостинским, как раз этой теме и была посвящена. Помимо работы приятно вспомнить и совместные походы на Первомайские демонстрации, работу на овощебазе и в колхозе, субботники на Варшавке. Отличительной чертой Александра Анатольевича в любой ситуации был позитивный настрой.



А.А. Соловьев с П.Н. Шебалиным



П.Н. Шебалин, А.А. Соловьев, Л.М. Соловьева, Е.А. Семенихина, Н.Н. Цыбин.
На конференции Европейского геофизического союза, г. Ницца.

В 1990 г. отдел вычислительной геофизики ИФЗ АН СССР выделился в отдельный Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики под руководством академика Владимира Исааковича Кейлиса-Борока, его заместителем стал Александр Анатольевич. Владимир Исаакович подолгу находился в заграникомандировках, и на А.А. Соловьева ложилось бремя решения многих институтских проблем. Это был период активных международных связей. Было много международных

проектов. А.А. Соловьев был бессменным блестящим фактическим организатором международной научной школы по прогнозу землетрясений, проводившейся раз в 2 года в Центре теоретической физики им. Абдуса Салама в Триесте в Италии. Школа проводилась, в основном, для «учеников» (иногда это были сформировавшиеся ученые) из развивающихся стран. С тех пор у института образовалось немало научных друзей по всему свету. Помимо этих школ (мне довелось несколько раз там участвовать в качестве лектора) вспоминаются и другие многочисленные встречи с Александром Анатольевичем «в тяжелых условиях заграницы», как до недавнего времени было принято шутить у сотрудников института. Восхищало умение Александра Анатольевича разделять работу и отдых так, чтобы и то, и другое имело полноценный характер.

В 1998 г. Александр Анатольевич возглавил Институт и оставался его директором до 2017 г. Так что получается, что из 40 с небольшим лет работы с А.А. Соловьевым в одном учреждении, почти 37 он был моим начальником. Если хочешь кому-нибудь искренне пожелать иметь хорошего начальника – пожелай такого как Александр Анатольевич. Я сейчас вспоминаю об этом потому, что, будучи сам «начальником» (в 2019 г. стал директором нашего института), часто вспоминаю Александра Анатольевича, чтобы стараться не совершать ошибок, которых он никогда не совершал. Он был предельно корректен со всеми, никогда не повышал на собеседника голос, всегда говорил так, чтобы его слова не могли показаться обидными. Главный принцип, которым он руководствовался как директор института, был не мешать тому, что и так хорошо делается. При этом он всегда был готов помочь, если его об этом просили. А потому и ему было невозможно отказать, если о чем-то просил он. В небольшом сплоченном научном коллективе, сплошь состоящим из личностей, такой стиль руководства принимали все.

Природный настоящий аристократизм Александра Анатольевича подкреплялся великолепной эрудицией, умением вести интересную беседу

практически на любую тему. При этом на многие вещи у него были вполне определенные собственные взгляды, которыми он любил с уверенностью поделиться. Поэтому поговорить с ним в непринужденной обстановке всегда было огромным удовольствием. Но в этой короткой заметке я хочу рассказать об одном эпизоде совместной научной работы.

Александр Анатольевич, несмотря на занятость на посту директора института, продолжал активно заниматься наукой. Он много публиковался, в том числе в соавторстве со многими сотрудниками Института. Мне же довелось поучаствовать в подготовке совместных с ним всего 3 статей. В начале 2000-х он очень активно занимался моделированием сейсмичности с помощью модели динамики систем блоков и разломов. В Институте эту модель уже давно принято называть просто «блоковая модель». Мне же довелось совместно с французскими коллегами из Парижского института физики Земли Клодом Аллегром, Жаном-Луи ЛеМуэлем и Клементом Нарто исследовать свойства предложенной ими иерархической бифуркационной модели очага землетрясения, получившей название S.O.F.T. (Scaling Organization of Fracture Tectonics). В блоковой модели никак не удавалось воспроизвести степенной характер связи между магнитудой землетрясения и площадью его очага, а в модели S.O.F.T. такая связь воспроизводится естественным образом. Поэтому и возникла идея «поженить» две модели. Обе модели изначально описывают динамику системы блоков и разломов, но в разных временных масштабах. Блоковая модель рассматривает медленные движения блоков, вызывающие накопление упругих напряжений в зонах разломов, тогда как модель S.O.F.T. описывает кратковременный процесс выделения энергии при землетрясениях.

Мы рассмотрели простой абстрактный вариант совместной модели. Тем не менее, в работе удалось показать, что объединение двух моделей возможно и потенциально плодотворно. Эта комбинация дает возможность устранить некоторые дефекты блоковой модели (например, линейную зависимость между энергией землетрясения и площадью очага), а в модель

S.O.F.T. вводит источники накопления упругой энергии. Работа была опубликована в 2002 г. в журнале *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.

Работать с Александром Анатольевичем было удивительно интересно и увлекательно. Мы были на большом расстоянии друга от друга, и все обсуждение шло по электронной почте. Он всегда очень быстро, детально и точно отвечал на мои вопросы. Естественно, и я со своей стороны старался действовать быстро. Блоковая модель, если опускаться до деталей, - это довольно сложная модель, и такая «интерактивная» работа и пояснения Александра Анатольевича мне помогли до какой-то степени разобраться в ней. Теперь, в постковидные времена такой стиль работы уже не кажется необычным и малоэффективным, но 20 лет назад у нас с Александром Анатольевичем просто не было другого выхода – другого времени на эту работу у нас просто не было. Справедливости ради надо отметить, что окончательные обсуждения мы провели уже после моего возвращения в Москву. Все-таки современные средства связи не могут полностью заменить реальное общение при решении какой-то научной задачи.

К сожалению, в дальнейшем нам не представилось новых возможностей продолжить эту работу. Но я по-прежнему убежден, что развитие блоковой модели как одного из возможных инструментов моделирования сейсмотектонических процессов, остается весьма перспективным направлением, особенно в связи с развитием GNSS-технологий точного определения смещений точек земной поверхности.

За следующие 20 лет мне довелось быть соавтором с Александром Анатольевичем всего двух статей. Одна из них в 2011 г. стала результатом широкого международного сотрудничества по проекту «*Extreme events: dynamics, statistics and prediction*» и была опубликована под одноименным названием в журнале *Nonlinear processes in geophysics*. Руководителем проекта был известный американский и французский геофизик Майкл Гилл (Michael Ghil), а Александр Анатольевич был со-координатором со стороны нашего института. В проекте участвовало около десяти организаций из

Европы и США. Это дало возможность значительно расширить круг научного общения, многие научные контакты затем продолжились независимо от проекта и даже вылились в совместные публикации. А эта самая статья до сих пор часто цитируется. Сейчас международное сотрудничество с европейскими и американскими научными организациями ушло в прошлое, но научное сотрудничество на персональном уровне иногда продолжается. В любом случае, результаты сотрудничества тех лет остаются в багаже наших знаний, и использование этих результатов в новых исследованиях может оказаться весьма продуктивным.

Еще одна статья в соавторстве с И.А. Воробьевой была посвящена анализу локальных особенностей выполнения закона Гутенберга-Рихтера и их связи с межплитовым сцеплением в Камчатской зоне субдукции. Нам удалось показать, что в зонах повышенного сцепления график магнитудно-частотного распределения землетрясений (так называемый график повторяемости) изгибается в сторону увеличения доли сильных землетрясений. Статья была опубликована в ДАН в 2019 г. Очень приятно вспоминать обсуждения деталей статьи с Александром Анатольевичем. Когда мы готовили публикацию, он уже ушел с поста директора института, и у него появилось больше времени. Но потом я заступил на этот пост, и времени меньше стало у меня. Очень жаль, что нам не удалось вместе продолжить эту работу. Было бы очень интересно попытаться включить зоны повышенного сцепления в блоковую модель и проверить наши результаты на модельной сейсмичности.

В заключение хочется еще раз вспомнить всегда окружавшую Александра Анатольевича атмосферу доброжелательности, тщательного отношения даже к мелочам в работе и в общении, умения радоваться хорошему и не унывать от неприятностей, его широкую эрудицию и всегда подчеркнуто уважительное отношение к любому собеседнику. Это делало работу под его началом или в соавторстве с ним всегда приятной и интересной.

Ан.А. Соловьев

МОИ НАБЛЮДЕНИЯ И ОРИЕНТИРЫ

Моим первым и главным олицетворением Академии наук был мой папа, Александр Анатольевич (АА). Первое в сознательном возрасте эмоциональное соприкосновение с Академией было довольно неудачным, т.к. было связано с моей отправкой в 1987 г. в пионерский лагерь «Поречье» под управлением Академии наук с подачи профсоюза ИФЗ РАН – пребывание в нем омрачали жутковатые воспоминания о более раннем посещении т.н. детского сада на даче, откуда меня систематически раньше срока забирала моя бабушка Мария Александровна (папина мама). К счастью, это был разовый опыт. Второе произошло в 1990 г. при разглядывании той же бабушки, которая тихо плакала рядом с магнитофоном за прослушиванием аудиозаписи, сделанной на только что состоявшейся защите папиной докторской диссертации в ИФЗ. Меня это сильно тронуло, ведь бабушка была далека от науки. В комнате мы были с ней одни, взрослые в это время гуляли в гостиной. Далее были увлекательные поездки в г. Триест (Италия), который АА регулярно посещал в качестве приглашенного исследователя и организатора международных школ в Центре теоретической физики им. Абдуса Салама, совместные с папиными коллегами прохождения компьютерных игр и другие контакты с научной средой, которые, надо сказать, мне очень нравились. Именно так, неявно, на протяжении первых двадцати лет моей жизни АА оказывал планомерное воздействие на формирование привлекательного образа академического антуража. Папа никогда не навязывал свой профессиональный выбор или желание его развития силами своих детей, и именно эта ненавязчивость в моем случае сыграла решающую роль в уверенном выборе профессии. В чем я не сомневаюсь и по сей день. При этом отмечу, что указанные события выпали на 80-90-е годы, когда отечественная наука была совсем не «фреш». Однако, когда речь заходила о фактах и знаниях в конкретной области, АА охотно

ими делился. Вот так он сочетал сдержанность в индоктринации и энтузиазм просвещения, таковым было его кредо.

Поколение X (или по-нашему поколение Перестройки), к которому я отношусь, в свои зрелые годы регулярно наблюдало тенденции к декадансу в обществе. Конечно, этому во многом способствовали последствия упомянутых 90-х. Папа оставался одним из немногих ориентиров в этом мраке. Общение с ним всегда погружало в уютную герметичную обстановку, в которой я был уверен в получении ответа на любой вопрос, которые я очень любил задавать. Он поистине был широко эрудированным человеком. Наверное, немалую роль в этом сыграло то время, на которое выпало его становление как личности, делающей свои первые сознательные шаги. Наукоцентризм, безусловный престиж исследовательской профессии, колоссальные по сложности вступительные экзамены – та самая среда, явившаяся полной противоположностью зрелому периоду онтогенеза поколений X, Y, Z. Отмечу несколько характерных сюжетов.

Окончив школу с золотой медалью в 1966 г., АА принял твердое решение поступать на мехмат МГУ. А середина 60-х пришлась на период самых сложных вступительных экзаменов по математике за историю факультета (неоднозначность решения, задачи-гробы и т.д.). При сдаче экзамена одну из задач комиссия папе не засчитала, посчитав его решение неверным. Будучи стопроцентно уверенным в обратном, папа подал на апелляцию. Впечатляет, что его не смутило то обстоятельство, что в состав комиссии входили, мягко говоря, не школьники. Еще больше впечатляет, что в итоге он доказал, что его решение верно! То есть уровень сложности задачи оказался на пределе компетентности принимающих экзамен.

В итоге АА окончил МГУ с красным дипломом в 1971 году. Порою приходится сталкиваться с отличниками, выпускниками с красными дипломами, - по сути отличниками по знаниям, но не умениям эти знания творчески использовать во благо дела. АА не только блестяще усвоил колоссальный багаж знаний. Его дальнейшая карьера беспрестанно

свидетельствовала об искусном умении пользоваться этим багажом в полном объеме. Вполне убедительным примером служит широчайший тематический разброс его кандидатской и докторской диссертаций – от теоретической астродинамики (1975 г.) до геофизики и магнитной гидродинамики (1990 г.). В наукоемких разговорах с папой цепочка моих вопросов и его ответов могла незаметно проследовать от движения небесных тел через радиоактивные свойства вещества до вопросов биологии. Вообще, его отношение к знаниям носило чисто утилитарный, инженерный характер, о чем он прямо говорил. Из этих соображений, например, в качестве базового учебника по электромагнетизму он мне в свое время посоветовал один из томов знаменитых Фейнмановских лекций по физике. Действительно, изложение материала по понятности и «осязаемости» у маэстро выше всяких похвал. Ричард Фейнман был великим инженером, и именно из любопытства к бытовым экспериментам и упражнениям в конечном итоге он пришел к Нобелевской премии по квантовой теории.

«...Через неделю я был в кафетерии, и какой-то парень, дурачась, бросил тарелку в воздух. Пока она летела вверх, я увидел, что она покачивается, и заметил, что красная эмблема Корнелла на тарелке вращается. Мне было совершенно очевидно, что эмблема вращается быстрее, чем покачивается тарелка. ... Диаграммы и все остальное, за что я получил Нобелевскую премию, вышли из этой пустячной возни с покачивающейся тарелкой» (Ричард Ф. Фейнман «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман!», 1985).

Сам факт причастности к естественной науке папа ценил очень высоко. Мне кажется, что папа считал научное призвание высшим предназначением человека и проявлением разума. Отсюда исходило его исключительное уважение ко всем ученым (за исключением шарлатанов, которых он довольно быстро вычислял, чему научил и меня). Он буквально сиял, общаясь с молодежью, посвятившей себя науке. Думаю, что за меня он был счастлив именно по этой причине. АА в своем отношении к ученым никоим

образом не разделял их на великих и скромных. Тот факт, что один великий ученый приходится на тысячи обычных, не умаляет роль рядовых исследователей – ведь без них тогда не будет и великих! Более того, зачастую именно совокупность не столь значительных результатов в своей критической массе подводит к большим научным открытиям. Из чего следует, что все, с любым уровнем научных достижений, заслуживают уважения в равной степени.

Ярко выраженные гуманитарные качества оформляли АА как цельную, запоминающуюся личность. К ним относились наличие страстной точки зрения по любому вопросу и при этом полная ассертивность, преданность делу, дружбе и семье, безусловное безразличие ко всему бесполезному и пустому. Взаимоотношения АА с Алексеем Джерменовичем Гвишиани (АДГ), которые строились на протяжении более полувека на чисто созидательных мотивах и бескрайнем взаимном уважении, для меня являются единственным эталоном настоящей дружбы. Собственно, не только досуг и юмор, но и сотрудничество, общее конструктивное занятие в совокупности позволяют проявиться максимально широкой палитре человеческих качеств, а их успешная проверка и есть дружба. Наша дружба с АДГ бережно сохраняет и укрепляет эти принципы и, надеюсь, служит ориентиром для родных и близких нам людей.

Модель супружеских отношений моих родителей, определившая и состав нашей семьи, оставалась для меня нерушимой на всем протяжении наблюдения за ней. Фундаментальную основу этой модели я всегда видел в экзистенциальной роли семейного института как неотъемлемой части жизни и сущности человека, который непременно становится супругом и родителем. Папа всегда подчеркивал, что, по сути, в пределе вся осмысленная жизнедеятельность может быть сведена к деятельности на благо только членов семьи. Кому-то (как и мне сейчас) эти два тезиса могут показаться банальностью, однако современный социум диктует несколько иные стандарты. В моем сознании эта модель как эталонная прочно

зафиксировалась с раннего детства и никогда не вызывала сомнений в своей неизбежной реализации. В итоге так и произошло. Очень рад, что обе мои дочери имели возможность проводить время и близко общаться с дедушкой.

Май 2023 г.



А.А. Соловьев и Ан.А. Соловьев на Школе молодых ученых, которая под руководством Александра Анатольевича проходила в июле 2017 г. (ИФЗ РАН, г. Москва)



Александр Анатольевич с супругой Ларисой Михайловной и внучкой Софьей, октябрь 2017 г. (на конференции «Глобальные вызовы и наука, диктуемая данными» в г. Санкт-Петербурге, 2017 г.)



70-летний юбилей А.Д. Гвишиани, октябрь 2018 года
(Фонд культуры «Екатерина», г. Москва).
Слева направо: А.Д. Гвишиани, А.А. Соловьев, Ан.А. Соловьев, Л.М. Соловьева

Л.М. Соловьева

ЛЮБИМЫЙ ЧЕЛОВЕК

Очень легко вспоминать человека, с которым прожил большую часть своей жизни, и который сделал её счастливой. И, если есть выигрышные лотерейные билеты, то это тот случай, когда Судьба дарит тебе такую встречу с потрясающим Человеком.

Я познакомилась с Александром в 1971 году на свадьбе моей подруги по консерватории, когда он был аспирантом в Институте прикладной математики АН СССР. При первой встрече меня поразили его добродушие и улыбка, которая располагала к приятному общению, и которая сохранилась в течение всей жизни. Интеллигентность, порядочность, умение владеть собой в любых обстоятельствах, выдержка во взаимоотношениях с близкими, друзьями и умение последовательно заниматься главным делом своей жизни - наукой, этими качествами Саша обладал сполна.

У Саши был прекрасный, ровный характер. Я никогда не видела его в плохом настроении, в депрессии. Ещё меня всегда восхищала его логика в рассуждениях, принятии важных решений по любым вопросам. Он мог дать правильный совет, и хороший результат был обеспечен. В этом проявлялась ещё с молодости его необыкновенная мудрость.



Л.М.Соловьева и А.А.Соловьев на банкете

Хотелось бы отметить невероятные знания Саши художественной и, особенно, исторической литературы. Он очень много читал в свободное время. Когда в семье или с друзьями в нашем доме затрагивались какие-то обсуждения событий прошлого, то Саша делился своими глубокими знаниями. Он знал точные даты этих событий, их детали, делал анализ жизни исторических личностей. Саша любил музыку, как классическую, так и лёгкую. Он связал свою жизнь с музыкантом, который дома должен заниматься по несколько часов на фортепиано, играть громко, повторять одно и то же место несколько раз. Какое нужно иметь терпение, чтобы слышать это всё в соседней комнате! Саша привозил из командировок или покупал в Москве пластинки, а потом и диски с оперной, симфонической, фортепианной музыкой, что делало мою жизнь наполненной новыми записями. В нашей квартире всегда звучала фоном эта музыка, а Саша в это время слушал её, работая за компьютером.



Л.М.Соловьева и А.А.Соловьев на конференции

Про интерес Саши к песенному жанру все его друзья и коллеги знали, так как могли убедиться в этом во время встреч на совместных праздниках. Темперамент, экспрессия и голос доводили присутствующих до слёз. Такова была сила исполнительского таланта Саши. Любимыми песнями в «его репертуаре» были «Три танкиста», «Айсберг», «Есть только миг» и другие. Постоянным, выдающимся партнёром в этих выступлениях, чему я была

свидетелем, являлся Алексей Джерменович Гвишиани. Этот дуэт незабываем. В один из новогодних вечеров, в прекрасном доме, где присутствовали Александра Пахмутова и её муж Николай Добронравов, Саша произвёл сильное впечатление на композитора, создателя песни «Надежда», а в другой новогодний праздник, который мы отмечали с близкими друзьями в ресторане, он перепел мощью своего голоса известного советского певца Льва Лещенко.

Большим увлечением Саши на протяжении всей жизни было приобретение советских марок, открыток, конвертов. С юношеских лет, еще учась в школе, при поддержке своего папы, Анатолия Васильевича, он начал интересоваться филателией и систематически пополнял свою коллекцию. Такое хобби доставляло Саше большое удовольствие, помогало в дополнительном изучении истории, культуры, природы, научных, спортивных событий и многих явлений жизни. Не было лучшего подарка для Саши, чем новый классер для марок.



А.А. Соловьев и Л.М. Соловьева в г. Ярославль

Пунктуальность, системность, организованность, сосредоточенность проявлялись во всём, к чему прикасался Саша. У нас дома прекрасная библиотека. Саша постоянно приобретал новые издания. Он сделал каталог всей имеющейся у нас литературы, и любую книгу можно найти в определённом шкафу на указанной полке. Для наших внучек, когда они были маленькими, Саша создал антологию лучших мультфильмов. Он переписывал их с телевизионных каналов. Всё это хранится в специальных папках под номерами. А для нас, взрослых, таким же способом, когда ещё не было возможности пользоваться Интернетом дома или на даче, он сделал прекрасную подборку под номерами художественных фильмов, исторических, документальных, музыкальных программ.

Саша был великолепным сыном своих родителей, братом сестры Людмилы, старшей его на 13 лет, мужем, отцом, дедушкой. Он каждый вечер звонил своей маме, Марии Александровне, а после её ухода из жизни звонил сестре, поддерживал её во всём. Его любовь к нам всем была безмерной. И как права была его мама, когда она при нашей первой встрече сказала: «Таких, как Саша, больше нет».

20 апреля 2023 г.

А.А. Шатеншейн, Е.Н. Алисова,
К.В. Волкова, В.Г. Трубенков

ОДНОКЛАССНИКИ О САШЕ СОЛОВЬЁВЕ

Мы учились в школе №135, которая находилась в Малом Гнездниковском переулке, дом 4. Сейчас там располагается НИУ ВШЭ, Институт профессиональной переподготовки специалистов. Саша Соловьев жил в доме №6 на Тверском бульваре. Семья занимала одну комнату в коммуналке.

Саша был худым, высоким, но вполне ловким и скоординированным мальчиком. Он был одним из лучших учеников в нашем классе. Хотя отличников в классе было несколько, Саша и еще один мальчик были безусловно сильнее остальных. Саша был организованным, умным и очень исполнительным учеником. Кажется, он всегда был старостой класса. У него был высокий, то, что теперь называется, социальный интеллект. Он ладил со всеми, даже с хулиганами. За одной партой он сидел не с отличником, а с мальчиком, преуспевающим в спорте. Естественно, он был хорошим старостой, и все учителя им были довольны. Саша Соловьёв был добросовестным и толковым. Он очень хорошо успевал по всей школьной программе, но особенно силен был в математике. В связи с этим учитель поручал Саше дополнительно заниматься с отстающими в нашем классе учениками. В 9 и 10 классах у нас неожиданно стал преподавать историю и литературу всем сегодня известный поэт, бард, кинематографист Юлий Черсанович Ким. Мы просто заслушивались, как он преподносил ту или иную тему по этим предметам. Однажды мы ходили с ним в поход, где все вместе пели его песни.



На школьном вечере.
Слева направо: Алла Буш, Елена Фомичёва,
Александр Соловьёв, Евгения Алисова

После окончания школы Саша поступил на мехмат МГУ. Позже, уже работая в Академии наук, занимая высокую должность и несмотря на загруженность в своей работе, он всегда находил время, чтобы встретиться со своими одноклассниками. Мы вспоминали о том, какие учителя были любимыми, а какие нет, с кем из ребят можно было поделиться своим личным, а кто был не очень сдержан в чужих секретах. Почти на всех встречах мы вспоминали, как нам повезло, что у нас был такой великолепный учитель Юлий Ким. И Саша на наших встречах очень тепло отзывался о нём и говорил, что очень много полезного и нового узнал тогда для себя, и это очень помогло ему в дальнейшей жизни.

АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ
СОЛОВЬЕВ
(1947-2021)

научное издание

Формат 64×84/16. Объем 9.75 усл. печ. л.

Тираж 70 шт.

Отпечатано в типографии ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88



Книга посвящена памяти крупнейшего российского ученого, доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН Александра Анатольевича Соловьева (1947–2021), научный путь которого неразрывно связан с Институтом теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, который он возглавлял в течение почти 20 лет. В книге отражена многогранная научная и организаторская деятельность А.А. Соловьева и его вклад в разработку методов математической геофизики для изучения геодинамики, прогноза мест сильных землетрясений, а также развития математических методов прогнозирования экстремальных явлений в социо-экономических системах. Воспоминания его коллег, друзей и близких, согреты светлой памятью, отражают лучшие профессиональные и человеческие качества А.А. Соловьева.