

УДК 550.34.013.2:551.2 (479-924.73)

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55514

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧНОСТИ СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

© 2014 Д.Н. Забирченко^{1,2}, В.А. Лаврищев¹

¹ОАО «Кавказгеолсъемка», Россия, 357600, Ставропольский край, г. Ессентуки, ул. Кисловодская, д. 203, kavkazgs@rusgeology.ru; ²Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и PCO-A, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

В ходе исследований, связанных с комплексным мониторингом геологической среды и оценкой степени сейсмической опасности Северо-Кавказского региона, построена трехмерная модель глубинного строения Кавказа на основе данных региональных сейсмических каталогов и компиляции современных представлений о тектоническом строении и геодинамике региона.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, сейсмоактивная зона, магнитуда, гипоцентр, геодинамика, глубинное строение, эндогенные геологические процессы, геологическая среда, Северо-Кавказский регион, трехмерное моделирование, ESRI, ArcMap, 3D-Analyst, ArcScene.

Краткий обзор сейсмичности региона

В сейсмическом отношении территория европейской части России принадлежит Северной Евразии, сейсмичность которой, согласно современным представлениям, обусловлена интенсивным геодинамическим взаимодействием нескольких крупных литосферных плит – Скифской, Аравийской, Туранской. Наиболее подвижны и, следовательно, активны границы плит, где формируются крупные сейсмогенерирующие орогенические пояса. В европейской части России самой высокой сейсмичностью характеризуется Северный Кавказ. Здесь известны землетрясения с магнитудой около $M=7,0$ и сейсмическим эффектом в эпицентральной области интенсивностью $I_0=9$ баллов и выше.

На современном этапе наиболее сейсмоактивна восточная часть Северного Кавказа – территории Дагестана, Чечни, Ингушетии и Северной Осетии. Сильным сейсмическим событием последнего 10-летия являлось Курчалойское землетрясение 11 октября 2008 г. с $M=5,6$ ($H=10$ км) $I_0=7,5-8$ баллов на Восточном Кавказе (Чечня, пограничная область с Дагестаном), повлекшее за собой человеческие жертвы и разрушения. Землетрясение затронуло 5 субъектов Российской Федерации: Чечню, Дагестан, Ингушетию, Осетию и Ставропольский край, а также сопредельные территории – Грузию и Армению. Эпицентр землетрясения располагался в районе Терско-Каспийского передового прогиба. Сейсмотектоническая позиция очага определяется приуроченностью его к одному из субширотных региональных глубинных разломов Северного Кавказа – Срединному разлому «кавказского» простираения. Ранее вблизи Курчалоевского очага, в 1976 г. произошло Черногорское землетрясение с сотрясениями в эпицентре 8-9 баллов и $M=6,4$, а с конца XIX века до начала XXI известно более 20 землетрясений с силой 6 баллов и выше. К наиболее сильным из них относятся: 8-ми балльное Терское (Эльдоровское) землетрясение 1912 г. с $M=5,7$ и очагом в мантии; 7-8

балльное Веденовское 1933 г. с $M=5,2$ и несколько 7-ми балльных землетрясений, произошедших в 1785 г. (Дагестанское – I с $M=5,5$), 1928 г. (Аргунское), 1966 г. (Аргунское-II), 1969 г. (Ачхой-Мартановское), 1971 г. (Старогрозненское), 1974 г. (Салатаусское). Черногорское землетрясение 1976 г. сопровождалось многочисленными афтершоками; в 1984 г. практически в этой же эпицентральной зоне с разницей в 9 часов, произошли два землетрясения с силой 6-7 баллов и $M=5,2-5,3$, за которыми также последовали многочисленные повторные толчки. После этого сейсмического события наиболее значительными были землетрясения меньшего энергетического уровня и удалены от эпицентра Черногорского землетрясения примерно на 100 км к западу и востоку: 3 августа 1989 г. с $M=5,0$, 31 января 1999 г. с $M=5,6$ (см. описание ниже), 12 октября 2006 г. с $M=4,5$ с очагом в верхней мантии. Ближайшие к очагу значительные по силе и ощутимости землетрясения произошли 31 марта и 9 ноября 1950 г. – Гудермесское – I с $M=4,2$, $I_0=6-7$ баллов и Гудермесское – II с $M=5,0$, $I_0=6$ баллов.

Из крупных сейсмических событий в Дагестане также известны землетрясения 09.03.1830 г. (Дагестанское-II с $M=6,8$, $I_0=8-9$ баллов) и 14.05.1970 г. ($M=6,6$, $I_0=8-9$ баллов). Эпицентральной зона последнего характеризовалась обилием вторичных нарушений земной поверхности: срывов каменных масс, оползней и т. д. В результате изучения остаточных деформаций грунтов, возникших при землетрясении, в т. ч. установлено, что сейсмогенные разломы при землетрясении не появились на земной поверхности, однако наблюдалась определенная приуроченность наиболее крупных остаточных деформаций к линиям, трассирующим глубинные разломы и разрывным нарушениям; при этом ни одна из выявленных деформаций не может считаться бесспорным результатом прямого смещения по тектоническому нарушению. В результате землетрясения был нанесен значительный материальный ущерб строительству Чиркейской ГЭС, повреждены промышленные и гражданские объекты, 179 жилых домов. Вместе с тем, было выяснено, что качественно построенные здания, с соблюдением технологических правил, практически не пострадали.

В зоне, расположенной в радиусе 50 км от эпицентра землетрясения 1970 г., реализовалось землетрясение 31 января 1999 г. ($M=5,6$), ощущалось в населенных пунктах силой до 5-6 баллов. Наиболее сильное событие в период афтершокового процесса землетрясения 31 января проявилось 21.02.1999 г. с $M=5,1$ и ощущалось силой до 6 баллов. Материальный ущерб, нанесенный землетрясением 31 января и его афтершоками, составил, по оценкам МЧС Республики Дагестан, около 35 миллионов рублей.

Сильное 7-8-ми балльное Кичигамринское землетрясение произошло 03.05.1988 г. ($M=5,3$ $H=10$ км). По последним данным ССД ГС РАН ощутимая сейсмическая активность в этой области фиксировалась 16 апреля 2013 г. Землетрясение с магнитудой $M=5,1$ и глубиной гипоцентра 10 км ощущалось в Мамаауле и Кичи-Гамри (в 13 км к северо-востоку от эпицентра) силой 6 баллов, в Мюрего и Сергокале силой 5-6 баллов и в Махачкале (в 65 км к юг-юго-востоку от эпицентра) силой 3 балла.

В центральной части региона, на территории Карачаево-Черкессии, вблизи Российско-Грузинской границы, произошли Тебердинское (1902 г., $M=6,4$, $I_0=7-8$ баллов) и Чхалтинское (1963 г., $M=6,2$, $H=5$ км, $I_0=9$ баллов) землетрясения. По последним данным ССД ГС РАН ощутимая сейсмическая активность в этой области

фиксировалась 26 марта 2013 года в Карачаево-Черкессии. Эпицентр землетрясения магнитудой $M=5,2$, очаг которого находился на глубине 5 км, располагался в 3 км к северо-востоку от Домбая, в 19 км к юг-юго-западу от Теберды, в 41 км к юго-востоку от Архыза, в 56 км к юг-юго-западу от Карачаевска. Ощущалось на верхних этажах зданий в Теберде, Домбае, Архызе силой 2 балла.

На Скифской плите местная сейсмичность связана со Ставропольским поднятием, частично захватывающим Адыгею, Ставропольский и Краснодарский края. Магнитуды известных здесь землетрясений пока не достигали $M=6,5$.

Район Ставропольского поднятия является единственным районом Скифской плиты, где происходили и происходят ощутимые землетрясения. Первое из них – Ставропольское землетрясение с силой 6-7 баллов ($M=4,6$) отмечено в 1827 г.; три семерибалльных землетрясения – Воровсколесское с $M=4,1$, Владимирское с $M=3,5$ и Невинномысское с $M=3,8$ произошли соответственно в 1895, 1947 и 1963 гг., и, наконец, второе Ставропольское землетрясение 1971 г. с $M=4,5$ проявилось на поверхности с силой 8 баллов. 19 октября 1999 г. произошло ощутимое землетрясение в 50 км от г. Ставрополя силой 3-4 балла.

В 1879 г. произошло сильное Нижнекубанское землетрясение ($M=6,0$, $I_0=7-8$ баллов). Многочисленные сильные и ощутимые землетрясения отмечены в районе Анапы, Новороссийска, Сочи и на других участках Черноморского побережья, в том числе и в акватории Черного моря. Активен и район Сочиного полигона, где в 1955 г. на линии Сочи – Красная Поляна произошло 7-балльное землетрясение (Краснополянское). За ним последовал рой землетрясений на побережье (в том числе и 6-7-мибалльное землетрясение в 1959 г. в районе Туапсе) и в акватории.

Нельзя не отметить самые крупные из известных землетрясений сопредельных с районом работ территорий и других зарубежных регионов (Крым, Турция, Грузия, Азербайджан, Армения), которые оказывали негативное влияние на геологическую среду Северного Кавказа. Так, землетрясения, ощущавшиеся на территории России интенсивностью до 5-6 баллов, произошли в Азербайджане в январе 1668 г. (Шемахинское-I с M около 8 и H около 20 км), в 1902 г. (Шемахинское-VII с $M=6,9$, $H=18$ км, $I_0=8-9$ баллов), в Армении в 1988 г. (Спитак $M=7,0$, $I_0=9-10$ баллов, $H=10-20$ км), в Грузии в апреле 1991 г. (Рачинское $M=6,9$, $I_0=8-9$ баллов) и в 1992 г. (Барисахское $M=6,3$, $I_0=8-9$ баллов).

Рачинское (Рача-Джавское) землетрясение 29 апреля 1991 г. охватило огромную территорию Кавказа, наиболее ярко проявившись на севере Грузии и в Южной Осетии. Землетрясение ощущалось на площади от Каспийского (Махачкала, 2-3 балла) до Черного моря (Сочи, 3-4 балла), а интенсивность сотрясений в эпицентре не превысила 8 баллов шкалы MSK-64, что было меньше ожидаемой. Данное землетрясение относится к наиболее полно изученным в инструментальном и геоморфологическом отношениях.

Основные итоги анализа накопленных материалов рассматриваются в монографии Т.П. Белоусова «Рачинское землетрясение 1991 года и его проявление в рельефе Большого Кавказа». В монографии автором, в числе других результатов, выделены сейсмогенерирующие блоки, участвовавшие в сеймотектоническом процессе Рачинского землетрясения: Гагро-Джавская зона мегантиклинория Большого Кавказа, Окрибо-Сачхерская зона Закавказского срединного массива и разделяющий их Рача-Лечхумский прогиб. Показано, что очаг землетрясения связан с разломом, ограничивающим Рача-Лечхумский прогиб с юга.

Вблизи эпицентральной зоны Рачинского землетрясения 1991 г. на юге Большого Кавказа в сентябре 2009 г. снова произошло сильное землетрясение $M=6,1-6,2$, которое проявилось на территории Южной Осетии интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64. Известны также землетрясения Барисахского очага. Самое сильное из них – 23.10.1992 г. ($M=6,5$), интенсивность в эпицентре составляла 7-8 баллов.

Относительно недавно имели место три крупнейших для Туранской платформы Газлийских землетрясения с магнитудами $M=7,0$ и $7,3$ – в 1976 г. и с $M=7,2$ – в 1984 г.

В Крыму отмечены 7-балльное и, особенно, разрушительное 8-балльное землетрясения, произошедшие 26 июня и 11 сентября 1927 г., с последующими афтершоками, достигавшими 6-7 баллов. Имеются исторические сведения о катастрофическом Понтикапейском землетрясении (приближенно датируется 63 г. до н.э.), разрушившим ряд городов по обе стороны Керченского пролива.

Измитское землетрясение ($M=7,6$), произошедшее 17 августа 1999 года в Турции, унесло жизни более 17 тысяч человек, около 44 тысяч было ранено, около 500 000 осталось без крова. Гипоцентр его располагался на глубине 17 км, эпицентр находился недалеко от промышленного города Измит. Землетрясение ударило по самым густонаселенным и промышленно развитым регионам страны (рис. 1). Серьезно пострадали жилые массивы (в т. ч. и по причине низкого качества строительства), нефтеперерабатывающая промышленность, несколько автомобильных заводов, а также турецкий флот. Значительные разрушения имели место и в Стамбуле, находящемся в 70 километрах от эпицентра. Общий ущерб от землетрясения оценивался минимум в 25 000 000 000 долларов. Ощущалось землетрясение, в том числе и на юге Северо-Кавказского региона. Последние, менее крупные, но достаточно заметные сейсмические события сопредельных территорий произошли в 2006, 2007 гг. в Грузии (Рачинское, $M=5,1$ и $6,1$, $I_0=6$ и баллов).

Вопрос о наличии на Кавказе отдельных зон с сейсмическими очагами в верхней мантии неоднократно обсуждался в литературе. В более поздних публикациях предполагалось, что природа подобных сейсмических событий связана с зоной, простирающейся от Копетдага, через центральный Каспий, вдоль Большого Кавказа вплоть до Крыма.

По В.И. Уломову наиболее опасными в сейсмическом отношении для российской части Северного Кавказа и Предкавказья являются две линеаментные структуры – Кипр – Кавказская и Крым – Копетдагская [Уломов и др., 2002]. Профиль Кипр – Кавказ (протяженность 1870 км) является ключевым для оценки сейсмической опасности на Северном Кавказе и в Предкавказье (рис. 1). Он начинается от Кипра, совпадает с простиранием Восточно-Анатолийского разлома и пересекает в северо-восточном направлении Кавказ, достигая акватории Каспийского моря. Сеймотектоника этого сегмента центральной части Альпийского – Гималайского складчатого пояса была объектом многих исследований и достаточно хорошо изучена в сейсмическом отношении.

Сведения о крупных землетрясениях с $M>7,0$ в юго-западной части профиля Кипр – Кавказ имеются за период, превышающий 3 тыс. лет (с 1356 г. до н.э.). За исторический период (526-1114 гг.) здесь выявлено четыре землетрясения с $M\geq 7,8$ (526 г. $M=7,9$; 859 г. $M=8,0$; 1046 г., $M=7,8$; 1114 г. $M=8,0$), однако с 1900 г. до сих пор не произошло ни одного землетрясения с магнитудой $M\geq 6,8$.

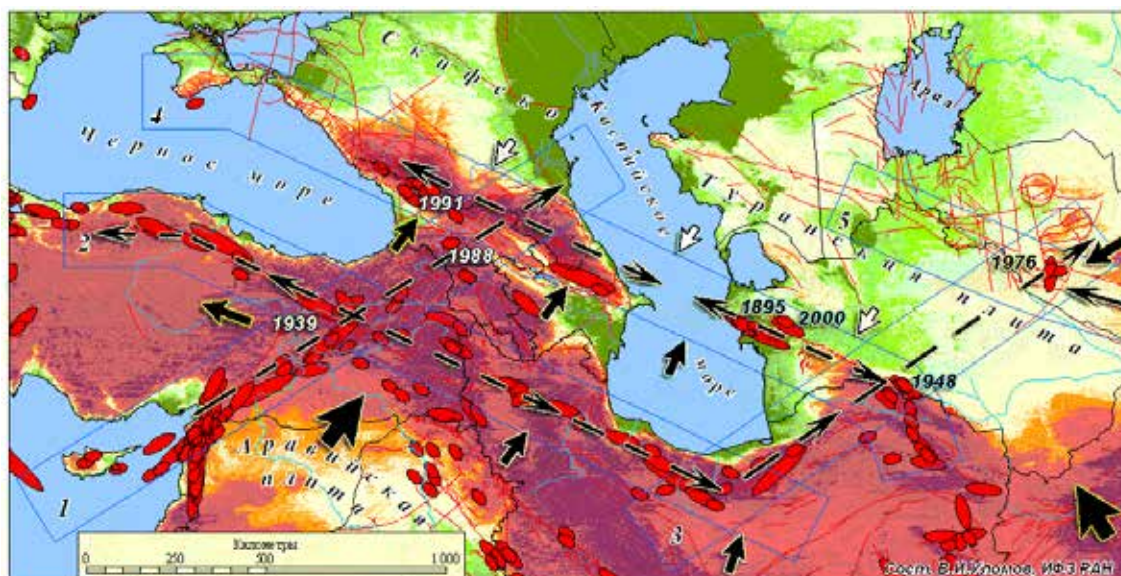


Рис. 1. Расположение профилей (полос), охватывающих сейсмолинеаменты, вдоль которых изучалось пространственно-временное и энергетическое развитие СГД-процессов (фрагмент по В.И. Уломову).

Профили: 1 – Кипр – Кавказ; 2-Анатолия – Эльбурс; 3 – Эльбурс – Туран; 4 – Крым – Копетдаг; 5 – Южный Тянь-Шань. Жирными черными стрелками указано направление геодинамического перемещения различных структур, белыми – реакция Скифско – Туранской платформы на сжимающие усилия со стороны Аравийской литосферной плиты и альпийских структур Иран – Кавказ – Анатолийского региона. Возле некоторых из очагов проставлены даты их проявления.

Крупные землетрясения с $M=7,3$ и с $M=7,0$ возникали в центральной части профиля в 1872 и 1893 гг., а в период 1900-2004 гг. заметно активизировалась его северо-восточная половина, где имели место многочисленные землетрясения с $M \geq 6,8$ в 1905, 1924, 1939, 1966, 1971 гг., случившиеся на территории Турции. Самым крупным было Эрзинджанское землетрясение 1939 г. с $M=7,8$. В 1988 и 1991 гг. произошли разрушительные землетрясения в Армении (Спитак) и Грузии (Рача – Джава). Характерной особенностью проявления сейсмичности вдоль всего рассматриваемого профиля явилось интенсивное высвобождение сейсмической энергии на протяжении семи столетий (500-1200 гг.), сменившееся таким же по продолжительности относительным сейсмическим затишьем (1200-1900 гг.). Преобладающее число очагов землетрясений вдоль всего профиля располагаются в пределах верхней части земной коры. Северо-восточное же окончание профиля Кипр – Кавказ действительно характеризуется резким снижением уровня сейсмичности при переходе к акватории Каспийского моря.

Вдоль профиля отчетливо выделяется три участка с заглубленными до 100-150 км гипоцентрами. Первый – на юго-востоке Турции и в районе Кипра, второй – на пересечении этого профиля с профилем Анатолия – Эльбурс, в районе Эрзинджана, и третий – в восточной части Большого Кавказа, в Сунженском прогибе.

Вопрос о наличии на Кавказе отдельных зон с сейсмическими очагами в верхней мантии неоднократно обсуждался в литературе. Имеются сведения о заглубленных очагах на Кавказе, в том числе в районе Терско – Сунженского прогиба. К ним относятся, в частности, землетрясения с $M=4,3$, произошедшие 17.07.1976 г. на глубине 125 км, и 18.01.1978 г. с глубиной очага 94 км ($M=3,4$).

Профиль Крым – Копетдаг (протяженность 2500 км), как и линеамент Анатолия – Эльбурс, является поперечным к направлению действующих геодинамических сил со стороны Аравийской плиты, и включает в себя два оффшорных участка – прибрежную северо-восточную область Черного моря и центральную часть Каспия [Уломов и др., 2006]. Этот профиль, в целом, достаточно четко прослеживаемый по геолого-геофизическим и сейсмологическим данным, можно разделить на четыре части. Его западная часть простирается от Крыма до середины Большого Кавказа и характеризуется относительно малым числом слабых и умеренных землетрясений при наличии палеосейсмологических свидетельств об очень крупных древних сейсмических событиях с $M \approx 7,0$ севернее Сухуми (эллипсы в этой части Большого Кавказа на рис. 1.). Сюда же следует отнести и сильное Ялтинское землетрясение 1927 г. с $M=6,8$, а также другие аналогичные по величине сейсмические события, в том числе Анапское землетрясение 800 г. до н.э. ($M=6,5$), два Керченских землетрясения – 63 г. до н.э. ($M=6,4$, Понтикапейское), 275 г. ($M=6,4$) и 1879 г. ($M=6,0$, Нижнекубанское). Имеются сведения о сейсмических событиях 1100 и 1750 гг. с $M=7,0 \pm 0,2$, случившихся на северо-западе Большого Кавказа. Здесь произошли Тебердинское землетрясение 1905 г. ($M=6,4$), Чхалтинское 1963 г. ($M=6,4$) и Рача-Джавское 1991 г. ($M=6,9$) в местах, где ранее землетрясений подобной величины не было известно. Наиболее активной, как уже отмечалось, является восточная часть Северного Кавказа. Третий, оффшорный, участок занимает центральную часть Каспийского моря, а четвертый относится к Копетдагу и области пересечения с профилем Эльбурс – Туран.

Самые крупные землетрясения вдоль этого профиля произошли по обе стороны от Каспийского моря: в 1668 г. ($M=7,8$) – в районе Шемахи, в юго-восточных отрогах Большого Кавказа, и в 1895 г. на западе Туркмении, южнее города Красноводск ($M=7,9$). В XX – начале XXI вв. здесь же возникли Казанджикское 1946 г. ($M=7,0$) и Балханское 2000 г. ($M=7,3$) землетрясения. На Копетдагском участке профиля за исторический период известны землетрясения 943 г. ($M=7,6$), 1209 г. ($M=7,4$), 1389 г. ($M=7,3$), 1405 г. ($M=7,6$). В XX в. возникли Гифанское (Гермабское) 1929 г. ($M=7,2$) и Ашхабадское 1948 г. ($M=7,3$) землетрясения. В 1902 г. по другую сторону Каспия произошло очередное Шемахинское землетрясение ($M=6,9$). Активен в сейсмическом отношении участок в акватории Каспийского моря, соединяющий полуострова Челекен и Апшерон. Здесь в 1911, 1931, 1935, 1986 и 1989 гг. произошли землетрясения с $M=6,0-6,5$.

Как и вдоль профиля Кипр – Кавказ, наибольшими глубинами очагов характеризуется восточная часть Большого и Северного Кавказа (район города Грозный). Достаточно протяженный участок заглуженных до 100 км очагов прослеживается далее на восток, включая западное побережье и акваторию Каспийского моря.

На Северном Кавказе и в Предкавказье ключевым является профиль Кипр-Кавказ. Он начинается от Кипра, совпадает с простиранием Восточно-Анатолийского разлома и пересекает в северо-восточном направлении Кавказ, достигая акватории Каспийского моря. Тектоника этого сегмента центральной части Альпийско-Гималайского складчатого пояса была объектом многих исследований и достаточно хорошо изучена в сейсмическом отношении. Сведения о крупных землетрясениях с $M > 7,0 \pm 0,2$ в юго-западной части профиля Кипр – Кавказ имеются за период, превышающий 3 тыс. лет (с 1356 г. до н. э.). За исторический период (526-1114 гг.) здесь зафиксировано четыре землетрясения с $M \geq 7,8$ (526 г., $M=7,9$; 859 г., $M=8$; 1046 г.,

$M=7,8$; 1114 г., $M=8,0$), однако с 1900 г. пока не произошло ни одного события с магнитудой $M \geq 6,8$.

Крупные землетрясения с $M=7,3$ и с $M=7$ возникали в центральной части профиля в 1872 и 1893 гг., а в период 1900-2004 гг. заметно активизировалась его северо-восточная половина, где ранее имели место многочисленные землетрясения с $M \geq 6,8$ в 1905, 1924, 1939, 1966, 1971 гг., в том числе и на территории Турции. Самым крупным было Эрзинджанское 1939 г. с $M=7,8$.

Особенностью проявления сейсмичности вдоль этого профиля явилось интенсивное высвобождение сейсмической энергии на протяжении семи столетий (500-1200 гг.), сменившееся таким же по продолжительности относительным сейсмическим затишьем (1200-1900 гг.). Северо-восточное окончание профиля Кипр-Кавказ характеризуется резким снижением уровня сейсмичности при переходе к акватории Каспийского моря.

Моделирование глубинного строения Северного Кавказа (СК) на основе данных региональных каталогов сейсмичности, геологической и геофизической изученности региона

Итак, мы обзорно рассмотрели «укрупненную ситуационную модель» региональной сейсмичности, попытки построения которой предпринимались многими исследователями с применением имевшихся традиционных технологий. Однако, для более детального изучения закономерностей развития сейсмических процессов региона и уточнения представлений о его глубинном строении, необходима более наглядная визуализация данных, позволяющая буквально «покрутить модель в руках», что дает возможность выделения пространственных линеаментов, очагов, скоплений и прочих трехмерных структур, с анализом их пространственного залегания и взаиморасположения. Технологии трехмерного моделирования в современных ГИС-системах шагнули далеко вперед, предоставляя пользователю широчайший инструментарий для обработки трехмерных геоданных. В качестве инструмента для построения модели, описываемой в данной статье, был выбран продукт компании ESRI ArcMap 9,3, а именно пакет расширения 3D Analyst и ArcScene. Данный пакет позволяет управлять 3D ГИС данными, выполнять 3D анализ, легко и быстро создавать 3D пространственные объекты, а также отображать слои в планметрическом 3D виде. В нем мы можем создать трехмерные пространственные объекты на основе двухмерных ГИС данных или оцифровать новые трехмерные векторные или растровые объекты в ArcMap, используя поверхность со значениями третьей координаты – z.

Для получения 3D-модели глубинного строения СК за основу была взята схема глубинного строения, построенная на основе обобщения современных данных геологической и геофизической изученности региона специалистами ОАО «Кавказгеолсъемка» (И.И. Греков, В.А. Лаврищев, ГК-1000, листы К-37,38,39), приведенная на рис. 2. На данной схеме выделяются блочные структуры Кавказа и Предкавказья, разделенные межблоковыми шовными зонами. Крупнейшими из блоков являются Центрально-Предкавказский, Восточно-Предкавказский и Западно-Предкавказский блоки, с юга граничащие с Центрально-Кавказским, Восточно-Кавказским и Нижне-Кубанским кристаллическими массивами. Вдоль большинства межблоковых шовных зон выделены зоны концентрации тектонических де-

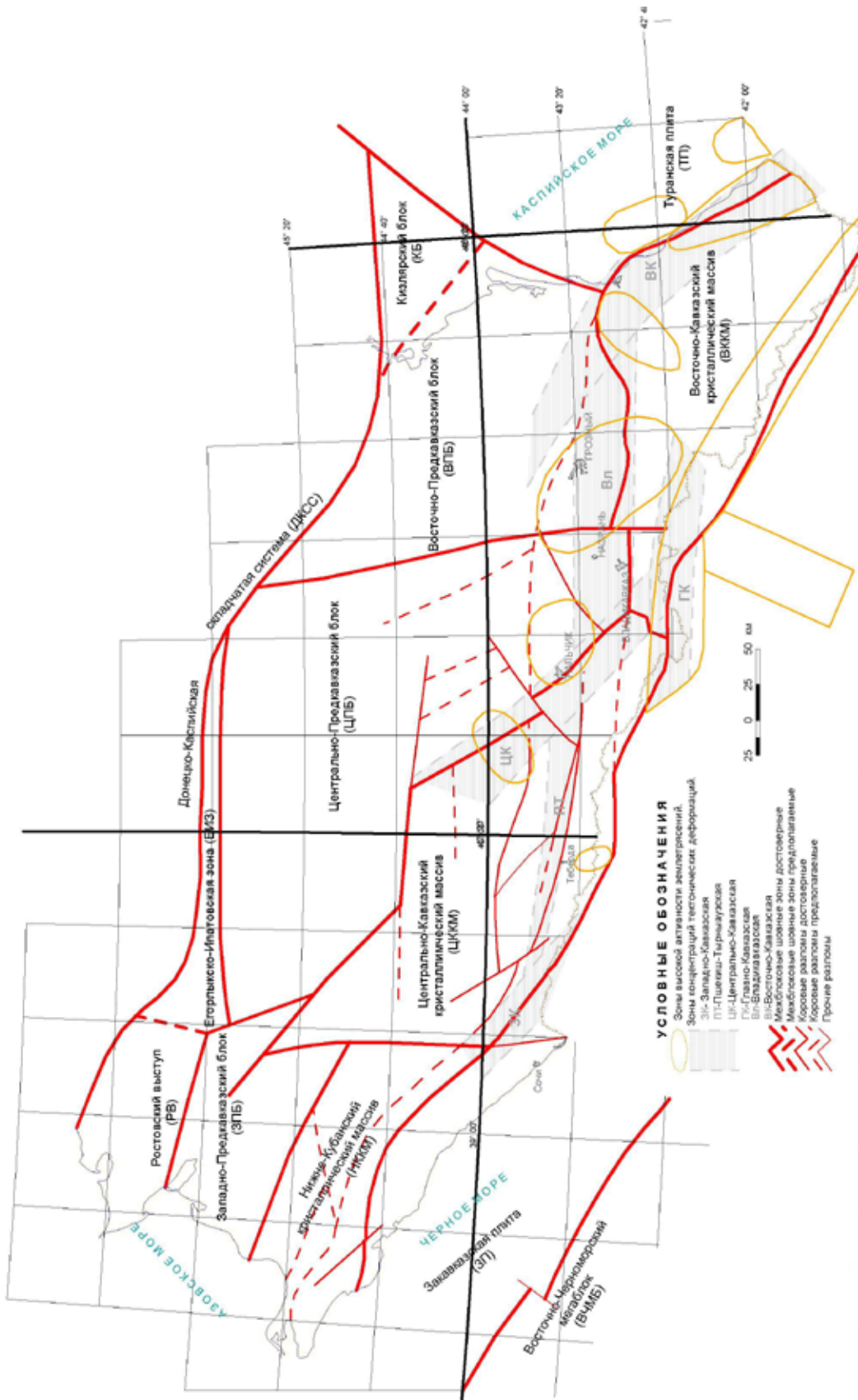


Рис. 2. Схема глубинного строения Северо-Кавказского региона (Греков, Лаврищев, ГК-1000, листы К-37,38, 39.) с уточнениями авторов.

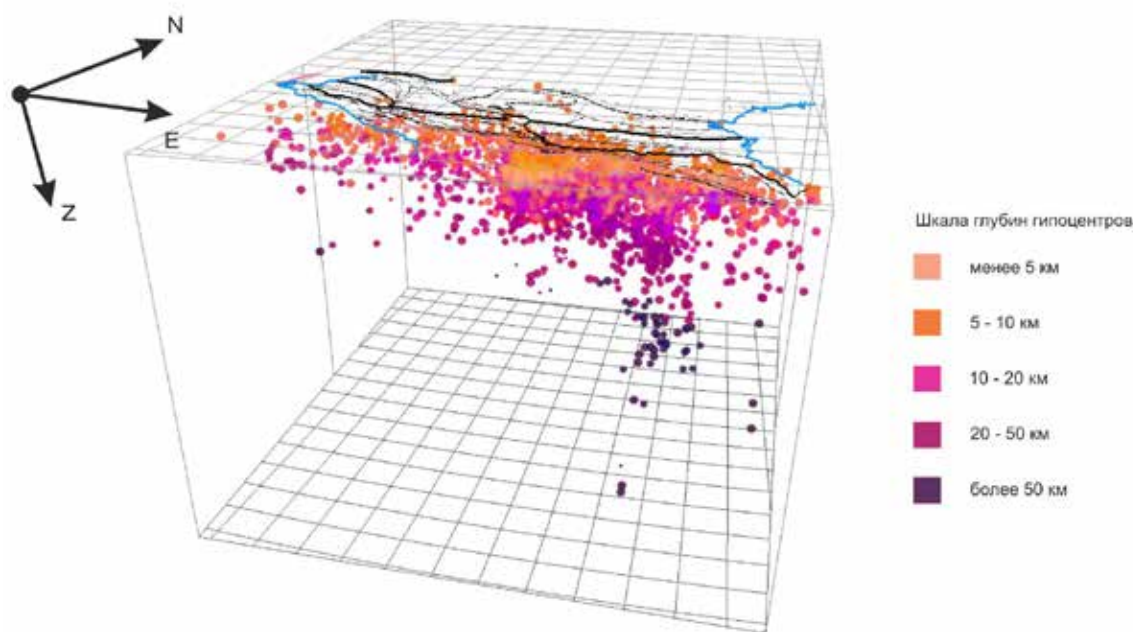


Рис. 3. Трехмерная модель сейсмичности Северного Кавказа. Общий вид

формаций – Западно-Кавказская, Пшекиш-Тырныузская, Центрально-Кавказская, Главно-Кавказская, Владикавказская и Восточно-Кавказская. Дополнительно на схему нанесены зоны высокой активности землетрясений [Греков и др., 2005].

Источником сейсмических данных послужили региональные каталоги землетрясений Геофизической службы РАН, данные каталога службы EMSC-CSEM и «Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4,0$ ($K \geq 11,0$) с древнейших времен по 2000 г.» А.А. Годзиковской.

На рис. 3 приведен общий вид построенной 3D модели (далее – модель) сейсмичности Северо-Кавказского региона. Гипоцентры землетрясений ранжированы по пяти «этажам» шкалы глубин, что позволяет рассматривать пространственное расположение групп гипоцентров по отдельности, либо в произвольной комбинации. Преобладающее число очагов кавказских землетрясений сосредоточено в верхней части земной коры на глубинах до 15-20 км и только в краевых зонах Кавказской структуры они достигают глубин 25-75 км. Районы с заглубленными до 100-150 км гипоцентрами выделяются в Терско-Каспийском прогибе.

Добавление к модели векторных слоев схемы глубинного строения и схемы тектонического районирования позволило более наглядно выделить пространственные линейменты различного простирания и очаговые области (рис. 4). При более детальном рассмотрении известных Рача-Джавского или Дагестанского очагов (выделены овалами), хорошо видны границы объемных структур, близких к шарообразным, несколько вытянутым в глубину с «центром масс» на уровне 10-15 км. К сожалению, статичность иллюстрации не позволяет настолько же явно выделить множество прочих объемных структур, насколько это возможно при динамическом рассмотрении трехмерной модели. К примеру, в динамике хорошо просматривается субвертикальная глубокозалегающая цилиндрическая структура в пределах Владикавказской зоны концентрации тектонических деформаций.

В целях достижения большей наглядности при анализе корреляции сейсмолинементов и глубинных структур, была предпринята попытка «прорезать» модель

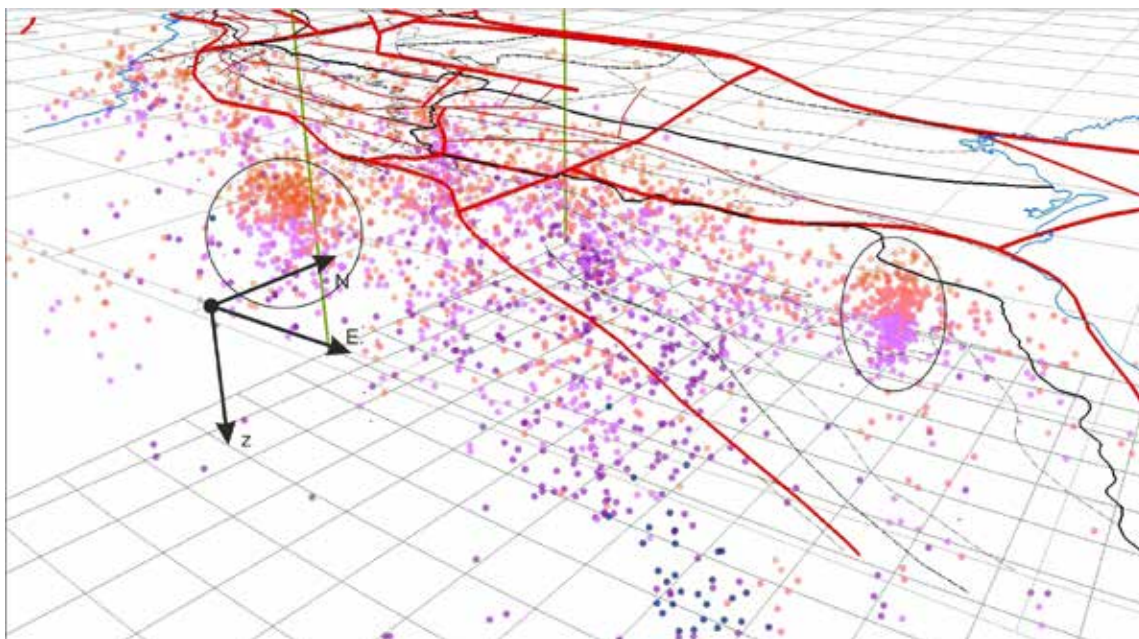


Рис. 4. Трехмерная модель сейсмичности Северного Кавказа на основе схем глубинного строения и тектонического районирования (альпийский этап). Выделение очаговых областей и пространственных линейментов

вглубь по основным линиям разломов и достоверных межблочных шовных зон. Разумеется, на первом этапе было сделано сознательное допущение, упрощающее модель, то есть разломы были «прорезаны вертикально» на глубину среднего залегания поверхности Мохо, то есть 50 км. Однако, даже такое упрощенное усовершенствование модели позволило увидеть гораздо больше пространственно-упорядоченных взаимодействий в относительном хаосе Кавказской сейсмичности (рис. 5).

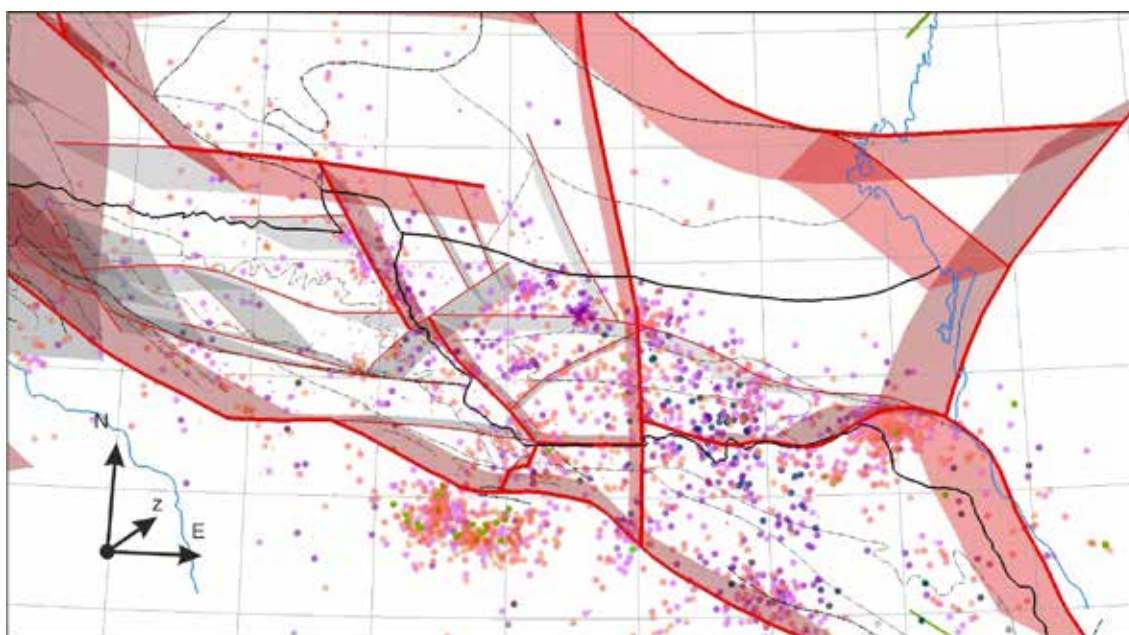


Рис. 5. Трехмерная модель сейсмичности Северного Кавказа с условно заглубленными на 50 км межблочными шовными зонами.

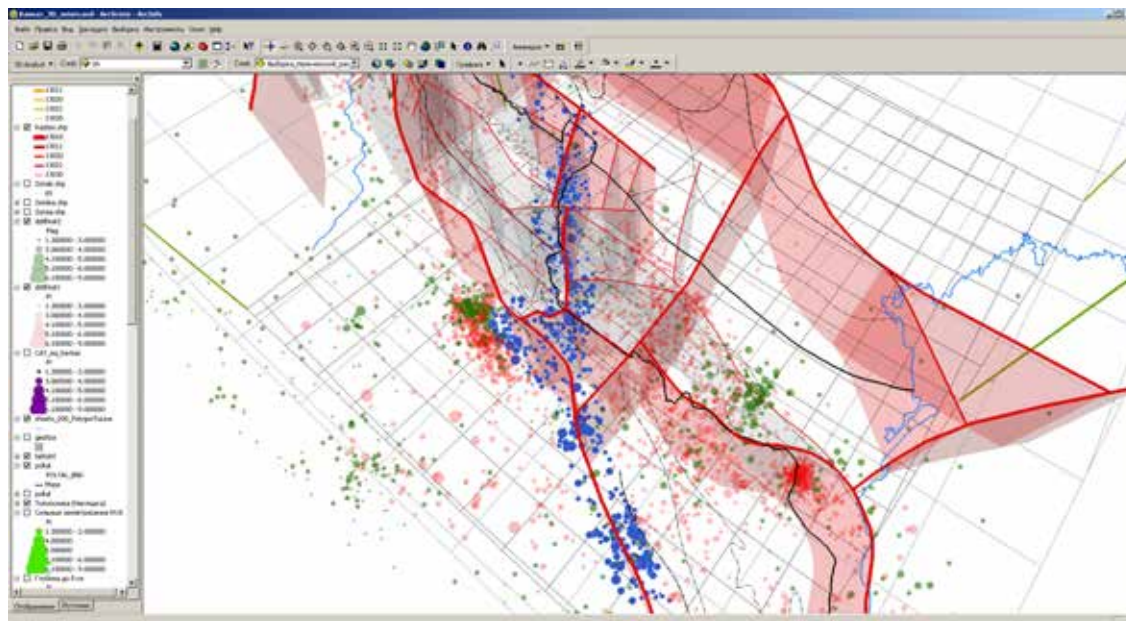


Рис. 6. Выделение протяженного сейсмолинеамента вдоль Главно-Кавказской и Центрально-Кавказской зон тектонических нарушений

В данном виде более отчетливо прослеживается приуроченность скоплений сейсмичности к основным границам выделяемых структурных блоков в пределах Центрально-Кавказской, Главно-Кавказской, Восточно-Кавказской зон концентрации тектонических деформаций (рис. 2, рис. 5). Причем, при детальном анализе возможно определить направление залегания глубинных межблочных границ по видимому отклонению пространственных сейсмолинеаментов от вертикали. В частности, хорошо заметно падение структуры в области Главного Кавказского надвига в направлении северо-восток, что обусловлено наличием зоны субдукции Закавказской (Аравийской) и Скифской плит [Лаврищев и др., 2012].

Подводя итог, отметим, что описанная выше работа по созданию трехмерной модели глубинного строения Северного Кавказа находится лишь на начальном этапе, однако уже сейчас получена работоспособная, наглядная, хорошо масштабируемая и многофункциональная модель, которая, при дальнейшей доработке, позволит уточнить данные о глубинном строении геологически-активного, сейсмоопасного и густонаселенного региона.

Литература

1. Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. О долгосрочном прогнозе сильных землетрясений в Центральной Азии и в Черноморско-Каспийском регионе «Физика Земли». №4. 2002 г. с. 12-20.
2. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П. О сейсмогеодинамике линеamentных структур горного обрамления Скифско-Туранской плиты «Физика Земли». №7. 2006.
3. Греков И.И., Лаврищев В.А., Энна Н.Л. Проблемы тектонического районирования Северо-Кавказского сегмента Евразийской литосферной плиты. Региональная геология и металлогения. N25, 2005. с.60-71.
4. Лаврищев В.А., Малофеева С.С., Забирченко Д.Н. Сейсмотектоническое районирование района Б. Сочи и прилегающих горных территорий. // Актуальные

проблемы геологии, планетологии и геоэкологии. (Материалы Всероссийской молодежной конференции 16 мая 2012г). Новочеркасск, изд-во «Лик», 2012 г., с.33-37.

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55514

3-D MODELLING OF DEEP STRUCTURE AND SESIMICITY OF NORTH-CAUCASIAN REGION

© 2014 D.N. Zabirchenko^{1,2}, V.A. Lavrishchev¹

¹OSC «Kavkazgeolsyemka», Russia, 357600, Stavropol Territory, Essentuki, Kislovodskaya street, 203, kavkazgs@rusgeology.ru; ²Center of geophysical investigations of VSC of RAS and RNO-A, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov street, 93a, e-mail: cgi_ras@mail.ru

As a part of the investigations connected with complex monitoring of geological environment and assessment of seismic hazard level of North-Caucasian region, 3-D model of deep structure of the Caucasus was made on the basis of regional seismic catalogue data and compilation of modern concepts of tectonic structure and region geodynamics.

Key words: seismicity, earthquake, seismically active zone, magnitude, focus, geodynamics, deep structure, endogenous geological processes, geological environment, North-Caucasian region, 3-D modelling, ESRI, ArcMap, 3D-Analyst, ArcScene.