УДК 550.34

# Карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа в детальном масштабе

# В.А. Акимов<sup>1</sup>, В.А. Зайцев<sup>2</sup>, А.С. Ларьков<sup>3</sup>, А.И. Лутиков<sup>3</sup>, А.Н. Овсюченко<sup>3</sup>, Л.В. Панина<sup>2</sup>, Е.А. Рогожин<sup>3</sup>, С.Н. Родина<sup>3</sup>, А.И. Сысолин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Автор для переписки: E.A. Рогожин, e-mail: eurog@ifz.ru

Аннотация. Приводятся результаты нового обобщения данных о сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального секторов Большого Кавказа. Подготовлен принципиально новый макет сейсмотектонической основы для карты сейсмической опасности региона. На базе этого макета произведены расчеты сейсмических воздействий на вероятностной основе. Работа состояла из трех этапов. На первом этапе проводились сейсмотектонические исследования, в результате которых была создана сейсмотектоническая модель и составлена карта зон возможных очагов землетрясений. На втором этапе была детально изучена сейсмичность и сейсмический режим территории. Третий этап включал в себя расчет повторяемости сейсмических сотрясений различной интенсивности на изучаемой территории на основе параметров уравнения макросейсмического поля, схем сейсмической активности, зон ВОЗ и наклона графика повторяемости. В результате были составлены карты сейсмической опасности региона. Северо-Западный и Центральный сегменты Большого Кавказа выглядят сейсмоопасной областью, где уровень сейсмических воздействий достигает 8.5 баллов по картам А и В. В то же время, по сравнению с данными карт ОСР-97 и ОСР-2015, полученные результаты более дифференцированны и в целом заметно понижают уровень сейсмической опасности региона. Работа важна с методической точки зрения в свете управления сейсмическим риском этой плотнозаселенной и активно осваиваемой территории России.

Ключевые слова: землетрясения, оценка сейсмической опасности, Кавказ, сейсмотектоника, палеосейсмогеология, зоны ВОЗ, сейсмическая сотрясаемость, сейсмический режим.

**Цитирование:** Акимов В.А., Зайцев В.А., Ларьков А.С., Лутиков А.И., Овсюченко А.Н., Панина Л.В., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Сысолин А.И. Карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа в детальном масштабе // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46, № 4. С. 57–74. https://doi.org/10.21455/VIS2019.4-4

# Введение

Исследование катастрофических природных явлений, в первую очередь сильных землетрясений – важнейшая часть более общей и весьма актуальной проблемы обеспечения экологической безопасности и безопасности населения, особенно в виду заметного увеличения ущерба от сильных землетрясений и связанных с ними цунами, оползней, обвалов и др. Особенно актуально это для таких тектонически активных областей, как Кавказ. Северный Кавказ отличается высокой плотностью населения, развитой инфраструктурой и в основном низким качеством гражданской застройки. Последнее обстоятельство в полной мере проявилось при умеренном Курчалойском землетрясении 11.10.2008 г. ( $M_S = 5.8$ ) на территории Чеченской Республики и Республики Дагестан, при котором имелись человеческие жертвы и серьезные разрушения [Рогожин и др., 2014].

<sup>©</sup> Акимов В.А., Зайцев В.А., Ларьков А.С., Лутиков А.И., Овсюченко А.Н., Панина Л.В., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Сысолин А.И., 2019 г.

Оценка сейсмической опасности для Кавказского региона в целом последний раз проводилась в ходе Международного проекта GSHAP в середине 1990-х годов [Balasanian et al., 1999]. С тех пор новых обобщений по оценке сейсмической опасности для региона в целом не выполнялось, хотя исследования в этом направлении проводятся здесь регулярно.

В настоящей статье на примере Северо-Западного и Центрального Кавказа рассмотрены результаты нового обобщения данных о сейсмической опасности региона. Работа проводится в рамках комплексного междисциплинарного проекта фундаментальных исследований РФФИ № 18-00-00247 КОМФИ «Оценка сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа в детальном масштабе на базе нового методического подхода» по теме «Оценка экономического и социального ущербов от опасных природных процессов для Северо-Западного и Центрального Кавказа на основе разработки новых карт детального сейсмического районирования и риска». Для составления такой карты необходима новая детальная карта сейсмической опасности региона.

В настоящее время подготовлен принципиально новый макет сейсмотектонической основы для карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа. На базе этого макета выполняются расчеты сейсмических воздействий на вероятностной основе. На следующем этапе исследований планируется провести оценку экономического и социального ущербов от опасных природных процессов.

## Методология исследований

Круг задач, решаемых при разработке макета новой карты сейсмической опасности Северного Кавказа, можно разделить на три блока [Лутиков и др., 2008]:

в первый блок объединяются сейсмотектонические исследования, в ходе которых на рассматриваемой территории с привлечением сейсмогеологических, неотектонических и геодезических данных по сейсмоактивным тектоническим структурам проводятся картографические работы, создается сейсмотектоническая модель и оценивается сейсмический потенциал. Итогом этих работ является составление карты зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ);

– второй блок это детальное изучение сейсмичности региона, причем здесь область анализа существенно шире, чем при сейсмотектонических исследованиях, поскольку необходимо учитывать возможный вклад в сейсмический эффект удаленных от объекта исследования высокомагнитудных зон ВОЗ, выявленных ранее на стадии общего сейсмического районирования (ОСР). При этом целесообразно использовать возможно более полный каталог землетрясений, составленный для области, границы которой отстоят на 150–200

км от рамок карты сейсмической опасности. Итогом работ на этом этапе являются картосхемы эпицентров сильных и слабых представительных сейсмических событий, разрезы распределения сейсмичности по глубине, данные о наклонах графиков повторяемости и схемы (матрицы) сейсмической активности, рассчитываемые в пределах каждой области, для которой был построен особый график повторяемости;

– работы третьего, заключительного, блока включают установление параметров уравнения макросейсмического поля (в большинстве случаев уже известного по литературным источникам) и на его основе по схемам сейсмической активности и зон ВОЗ с учетом наклона графика повторяемости проведение расчетов повторяемости сейсмических сотрясений различной интенсивности на территории, где оценивается сейсмическая опасность. Итогом этих работ является картирование исходного сейсмического балла в рамках карты сейсмической опасности с вероятностями возможного превышения в течение 50 лет 10 % – для объектов пониженной и нормальной ответственности и 5 % – для строительных объектов повышенной ответственности.

При этом в работах первого блока на стадии оценки сейсмического потенциала привлекаются данные о сейсмичности, полученные в результате исследований в рамках второго блока.

Выделение сейсмоактивных тектонических структур осуществляется на основе:

1) сбора, анализа и обобщения фондовых материалов по сейсмичности, геологии, тектонике, новейшей тектонике, четвертичной и современной активности геологических структур, глубинному строению с использованием картографического материала масштаба 1 : 1 000 000 и крупнее;

2) выявления и предварительного определения параметров активных тектонических структур по данным дистанционного зондирования (дешифрирование аэро-, космоснимков и карт цифрового рельефа территории);

3) детального геолого-геоморфологического изучения активных тектонических структур, изучения сейсмодеформаций и палеосейсмодислокаций в районах исследований (полевые работы), отбора образцов и датировки истории движений по разломам;

4) обобщения всего имеющегося материала в виде карт палеосейсмодислокаций, активных разломов и зон BO3.

На основании анализа имеющихся сейсмологических баз данных был составлен сводный унифицированный по магнитуде  $M_S$  каталог исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений, который охватывает всю территорию Западного Кавказа (рис. 1).





**Рис. 1.** Эпицентры землетрясений Западного Кавказа по инструментальным и историческим данным с древнейших времен по 2017 г.

Показаны основные разрывные и блоковые (см. рис. 2), а также складчатые структуры: 1 – сбросы; 2 – надвиги; 3 – оси антиклинальных складок в неоген-четвертичных отложениях

# Дистанционные сейсмотектонические исследования

Основу проведенных неотектонических исследований составлял структурно-геоморфологический анализ рельефа, направленный на выявление новейших дислокаций.

Формирование рельефа региона. Время становления структурных форм в рельефе на Кавказе, т.е. конэрозионный этап, датируется поздним сарматом, а именно 10 млн лет. С этого времени начинается активный рост Кавказского орогена. В процессе становления горного сооружения выделяются две стадии. Первая – конденудационная, соответствующая общему поднятию в условиях малых скоростей, при которых воздымание полностью компенсируется процессами денудации, а в пред- и межгорных впадинах накапливаются тонкие молассы. Нарастание скорости тектонических движений вызывает отставание процессов денудации и приводит к морфологическому становлению горного сооружения в рельефе. В это время в пред- и межгорных впадинах происходит накопление грубых моласс, являющихся продуктами размыва растущего орогена. Рост горного сооружения приводит к расчленению растущего поднятия процессами денудации, преимущественно эрозией, и эта – вторая – стадия развития выделяется как позднеорогенная – конэрозионная.

Нами проведено на новом методическом уровне структурно-геоморфологическое дешифрирование топографических карт масштаба 1:1000000 и космических снимков, включая радарные изображения, с привлечением различных геолого-геофизических материалов и данных, полученных предшественниками. При дешифрировании использовались ГИС-технологии, позволяющие сопоставлять разного рода материалы, получать наиболее достоверную информацию о новейших дислокациях, проводить их корреляцию с геологическими, сейсмическими событиями, современными горизонтальными и вертикальными движениями.

Дешифрирующие признаки для выделения новейших структур, которые являются основой

структурно-геоморфологических исследований, перечислены во многих работах. Главными дешифрирующими признаками являются рисунок гидросети и абсолютные отметки рельефа (среди них огибание гидросетью оснований склонов растущих поднятий, образование антецедентных участков долин на их сводах, увеличение глубины врезания русел). Радиальный рисунок гидросети указывает на формирование новейших пликативных форм. Расхождение гидросети от центра по радиусам свидетельствует о растущем поднятии, а схождение – на формирующуюся впадину. Линейнорасположенные речные долины и их участки часто приурочены к зонам разрывов, флексур, повышенной трещиноватости и т.п., которые традиционно называются «слабыми зонами» Костенко, 1999]. В последнее время чаще употребляется термин «линеамент», который имеет более широкое толкование. При использовании этого термина мы вкладываем в его понимание тектоническую природу. В этом смысле термины «слабая зона» и «линеамент» близки. В результате проведенного анализа рельефа были выявлены главные разрывные нарушения, определена их кинематика, а также системы разного ранга блоков, поднятий и впадин, создающих новейшую структуру Кавказа.

Дешифрирование картографических материалов дополнялось построением и интерпретацией геолого-геоморфологических профилей. Интерпретация профилей позволяет определить морфологию поднятий и впадин в продольных и поперечных сечениях, выявить особенности строения и деформации конэрозионных поверхностей, ступеней рельефа, эрозионных врезов, оценить амплитуды новейших дислокаций, а также степень соответствия тектонических дислокаций их современному выражению в рельефе, классифицировать их на древние, новейшие новообразованные и унаследованные, определить их активность на новейшем этапе.

С помощью анализа амплитуд рельефа можно выявить разноамплитудные пликативные деформации – поднятия и впадины, а также блоки разного ранга и амплитуды, ограниченные слабыми зонами или линеаментами. Сопоставление последних с разрывными нарушениями, установленными с помощью геологических и геофизических методов, позволяет с большей долей уверенности говорить о тектонической природе выявленных дислокаций и считать слабые зоны явными или скрытыми разрывными нарушениями.

Выявленные таким образом новейшие дислокации Северо-Западного Кавказа и западной части Центрального Кавказа представляют собой серию блоков, нарушенных разрывными нарушениями. Амплитуды тектонических движений начиная с позднего миоцена показаны нами на картах в изобазах с учетом исследований Е.Е. Милановского [1968].

Изучение неотектонического строения Северо-Западного и Центрального Кавказа показало,

что начало формирования горного сооружения Большого Кавказа датируется поздним миоценом, когда в конце сарматского и в меотическом веке стало образовываться сводовое поднятие. Резкое усиление воздымания Большого Кавказа в позднем сармате фиксируется значительным погрубением осадков. Это галечники и грубые песчаники, которые сейчас обнажаются по южной периферии передовых Предкавказских прогибов. В это время прогибы вовлекались в интенсивное погружение, которое сопровождалось накоплением мощных толщ верхнего сармата. Их мощность (> 1200 м) в несколько раз больше, чем мощность отложений нижнего и среднего сармата. Единый Предкавказский прогиб, начало заложения которого приходится на конец олигоцена – ранний миоцен, к современной эпохе существенно сократил свои размеры; произошло его разделение на ряд прогибов (Западно-Кубанский, Восточно-Кубанский, Терско-Каспийский), усложнилось строение. Эти изменения вызваны дальнейшим развитием в позднем плиоцене и плейстоцене (вплоть до наших дней) орогенного процесса, который характеризуется доминирующим разрастанием положительных структурных форм за счет сопредельных отрицательных. Наряду с вертикальным ростом происходило дальнейшее расширение поднятий Кавказа [Костенко, Панина, 2001].

Горноскладчатое сооружение Большого Кавказа возникло на месте альпийских бассейнов, развивавшихся с конца палеозоя или ранней юры. В современном рельефе оно выражено сводовоглыбовым поднятием с амплитудами до 4.0–4.5 км с крутым южным и пологим северным склоном, амплитуды которых соответственно равны 2.5-3 и 1-2.5 км и уменьшаются в стороны ограничивающих поднятие предгорных и межгорных впадин. Поднятие Большого Кавказа погружается к северо-западу и юго-востоку и разделяется на ряд поперечных сегментов - ступеней, ограниченных новейшими зонами разломов. Западная ступень – слабоприподнятое горное сооружение Северо-Западного Кавказа, а центральная ступень соответствует наиболее поднятому Центральному Кавказу. Границей между ступенями служит поперечная Пшехско-Адлерская зона разломов, возможно, с правосдвиговой составляющей. Отдельные разрывы этой зоны достаточно хорошо дешифрируются в рельефе, имеют в целом северсеверо-западное простирание, пересекают горное сооружение и продолжаются в Западно-Кубанскую предгорную впадину, где служат ее восточной границей.

Северо-Западный сегмент Большого Кавказа. В современном рельефе Северо-Западный Кавказ это асимметричное сводово-глыбовое поднятие со слабыми (250–500 м) и умеренными (до 1.5–2.0 км) высотами. Свод поднятия имеет уплощенную форму, южный склон крутой, северный – пологий. Склоны сооружения объединяют системы складчато-блоковых поднятий, амплитуды которых уменьшаются в сторону

60

Западно-Кубанской и Черноморской впадин, создавая ступенчатый рисунок в рельефе. Эти ступени отделены друг от друга продольными (субширотными) региональными разломами – взбросами, надвигами, сбросами. К наиболее протяженным сбросам относятся выделенные ранее в работах [Несмеянов, 1992, 1999; Рогожин, Овсюченко, 2005]. Некоторые из них на отдельных участках совпадают со сбросовыми дислокациями, показанными на приведенных нами картах (рис. 2, 3). Основные сбросы: Гайдукский, Бабичевский, Неберджаевский, Северо-Шизский Северо-Котхский.

Существенное место в новейшей структуре Северо-Западного Кавказа занимают и взбросово-надвиговые дислокации. Серия надвигов, проявляющихся в рельефе, установлена по данным бурения [Попков, 2007]. Хорошо выражен в рельефе Ахтырский надвиг, по которому северный склон горного сооружения надвинут на Западно-Кубанскую предгорную впадину. Надвиг имеет сложное строение и состоит, в свою очередь, из серии отдельных надвигов, по которым структуры Собербаш-Гунайского синклинория переместились на север, перекрывав южный склон Западно-Кубанской предгорной впадины. Такое взаимоотношение орогенов с предгорными впадинами типично и встречается довольно часто. В современном рельефе здесь четко выделяется ступень, что позволяет некоторым исследователям трактовать зону сочленения как Ахтырскую флексурно-разрывную | Несмеянов, 2001 |. По геофизическим данным эта пограничная зона интерпретируется как вертикальный глубинный разлом. Анализ кривых тектонического прогибания территории Западно-Кубанской впадины показал, что начиная с позднего миоцена происходила миграция прогиба на север и запад [Костенко, Панина, 2001]. На это указывает и смещение на север русла р. Кубань. Последнее обстоятельство свидетельствует, скорее, о взбросо-надвиговой природе Ахтырского разлома.

Южнее Ахтырского разлома в рельефе хорошо выражены надвиги с северным и южным падением, нарушающие структуры Псебайско-Гойтского антиклинория. На востоке (на участке Туапсе–Сочи) в новейшей структуре прослеживается Главный Кавказский надвиг с северным падением сместителя. Южнее, от Сочи до Пшехско-Адлерской зоны разломов, в рельефе выражен Воронцовский надвиг также с падением плоскости сместителя на север.



Рис. 2. Карта порядков речных долин и новейших разрывных нарушений Западного Кавказа 1 – сбросы; 2 – надвиги; 3 – разрывы с неопределенной кинематикой. Цифры в кружках – разрывные нарушения: надвиги и взбросы: 1 – Ахтырский, 2 – Главный Кавказский, 3 – Воронцовский, 4 – Черноморская система; сбросы: 5 – Гайдукский, 6 – Бабичевский, 7 – Неберджавский, 8 – Северо-Шизский, 9 – Южно-Фанагорийский, 10 – Мзымтинский, 11 – Чвижепсинский, 12 – Кепшинский, 13 – Западно-Псеушкинский, 14 – Горяче-Ключевской, 15 – Нужский, 16 – Южно-Сибистинский, 17 – Архызский, 18 – Северо-Свистуновский, 19 – Южно-Ацгаринский, 20 – Северо-Котский; разрывные поперечные зоны: 21 – Пшехско-Адлерская; субмеридиональные зоны разрывов: 22 – Усть-Кубанская, 23 – Новороссийская, 24 – Дивноморская, 25 – Абинская, 26 – Краснодарская, 27 – Джубгинская, 28 – Новомихайловская, 29 – Майкопская, 30 – Армавирская, 31 – Зеленчукская; субширотные зоны разрывов: 32 – Армавиро-Невинномысская



Рис. 3. Карта неотектоники Северо-Западного и Центрального Кавказа 1 – сбросы; 2 – надвиги; 3 – разрывы с неопределенной кинематикой

Если на суше Северо-Западный Кавказ это единое сводово-глыбовое поднятие, то в Черном море, в погруженной части Туапсинского прогиба, хорошо выражена система линейных субширотных складок, осложненных протяженными евзбросами и надвигами. С позднего сармата этот район испытал опускание до 3-4 км и до нынешнего времени в отложениях Туапсинского прогиба происходит складкообразование. Осевые поверхности складок наклонены к северу, как и взбросы и надвиги, по которым структуры Туапсинского прогиба надвигаются на поднятие Шатского, где отложения залегают почти горизонтально.

Помимо субширотной зональности для Северо-Западного Кавказа, как и для всего Большого Кавказа, характерна и поперечная зональность, обусловленная ступенчатым понижением абсолютных отметок блоков рельефа в направлении от Пшехско-Адлерской поперечной зоны разломов на запад от 2000 до 100 м (п-ов Тамань). Субмеридиональные дислокации – сбросы, часто осложненные сдвиговой компонентой, – представляют собой, как правило, структуры растяжения, возникшие при росте поднятий в субмеридиональном поле сжатия. Эти разрывы разрабатывают речные долины, смещают хребты, вдоль них изменяется простирание структур, они служат границами разновысотных блоков, часто маркируются эпицентрами землетрясений. Зоны дислокации, как правило, прослеживаются в область Западно-Кубанской впадины. К ним относятся (с запада на восток) Усть-Кубанская, Новороссийская, Дивноморская, Краснодарская, Новомихайловская, Туапсинская (см. [Костенко, Панина, 2001]). Туапсинская интерпретируется как зона поперечного

дробления с грабенообразными прогибаниями Несмеянов, 2001 |.

На западе сводово-глыбовое поднятие Северо-Западного Кавказа граничит с более опущенной Керченско-Таманской областью, отделяющей Кавказ от Горного Крыма. Новейшие поднятия (антиклинали) Тамани вытянуты в северо-восточном направлении, в то время как структуры Северо-Западного Кавказа имеют субширотное (западсеверо-западное) простирание. Резкое изменение простираний и абсолютных отметок рельефа указывает на наличие здесь поперечной зоны разломов, проходящей через Анапу на юге и Темрюк на севере и названной ранее нами Усть-Кубанской. Эта зона отделяет высокую (100–200 м) равнину от расположенной восточнее системы возвышенностей (200-500 м) Кавказа. Севернее она разделяет шельф Азовского моря и низкую равнину Западно-Кубанской впадины.

Центральный сегмент Большого Кавказа. Центральная ступень Большого Кавказа расположена восточнее Пшехско-Адлерской зоны разломов и флексур. В настоящей статье рассматривается ее западная часть, ограниченная на востоке меридианом г. Черкесск; на юге ее граница проходит вдоль г. Хоста и южнее Архыза, Верхней Теберды и Красного Карачая. Абсолютные отметки рельефа в центральном поднятии Кавказа составляют более 3 км. Сводовая часть поднятия оконтуривается изобазой 3.5 км. Горное сооружение и в этом сегменте по-прежнему обладает асимметрией (крутой южный и пологий северный склон), но становится шире. Эта ступень имеет сложную структуру и соответствует кристаллическому ядру Большого Кавказа, сложенному палеозойскими метаморфическими породами и гранитными интрузивами, которые в рельефе выражены наиболее высокими горными вершинами. В новейшем структурном плане здесь также проявляются продольная и поперечная тектоническая зональность, что выражено в рельефе в виде блоков разной амплитуды.

Границами блоков служат разрывы (сбросы, взбросы, сдвиги). Наиболее протяженные разрывы показаны на карте (см. рис. 2). Разрывы выражены в рельефе уступами и подчеркиваются фрагментами речных долин. Крутой южный склон нарушен Главным Кавказским надвигом, северный склон осложнен серией субширотных сбросов. К протяженным зонам разрывов сбросового типа северного склона относится субширотная Архызская, параллельные ей и расположенные севернее Южно-Ацгаринский и Южно-Сибистинский сбросы. Горяче-Ключевской сброс отделяет существенно вырожденную, значительно втянутую в поднятие Восточно-Кубанскую предгорную впадину от северного склона Кавказского орогена. В современном рельефе эта впадина соответствует высокой равнине с абсолютными отметками 100-500 м.

Ставропольское поднятие, примыкающее к орогенному сооружению с севера, также нарушено серией разрывов запад-северо-западного простирания, параллельными структурам Кавказа. В район исследования частично попадает Армавиро-Невинномысская зона, имеющая продолжение на востоке, проходя через район Минеральных Вод и восточнее. Севернее параллельно ей в рельефе выражена зона разрывов, проходящая через Ставрополь и далее на восток в область Терско-Каспийского прогиба. Обе зоны развывов подчеркиваются сейсмичностью.

Помимо субширотных, в новейшей структуре Центрального сегмента Кавказа существенную роль играют поперечные разрывные дислокации. Эти разрывы имеют субмеридиональное (северсеверо-восточное) и север-северо-западное простирание и разрабатываются фрагментами речных долин Белой, Малой и Большой Лабы, Большого Зеленчука, Теберды, Подкумка и др. Начинаясь в сводовой части орогена, разрывы прослеживаются и в область Скифской плиты: Восточно-Кубанскую впадину и Ставропольское поднятие. Являясь границами блоков с разными максимальными отметками рельефа и в сочетании с продольными разрывами субкавказского простирания они образуют блоковую структуру Кавказа.

# Структурно-тектонические исследования

Таким образом, новейшая структура Северо-Западного и Центрального секторов Большого Кавказа представляет собой асимметричное сводово-глыбовое поднятие с пологим северным и крутым южным склоном. Оно нарушено субширотными, субмеридиональными и диагональными разрывами. Главный субширотный (продольный) элемент Большого Кавказа – центральное поднятие, свод которого на рассматриваемой территории очерчен изобазами с максимальными значениями 3.5 км в Центральном сегменте и до 250 м на периферии Северо-Западного Кавказа. С севера и юга поднятие обрамляют внутренние и внешние системы поднятий и впадин, формирующие его склоны, граничащие с предгорными впадинами и поднятиями Скифской плиты. Значения изобаз на границах со структурами обрамления Скифской плиты колеблются от 500 м в Центральном сегменте Кавказа до нулевых значений на границе орогена с Черноморской и Западно-Кубанской впадинами в Северо-Западном сегменте.

Горное сооружение Большого Кавказа испытывает на новейшем этапе активный рост и разрастание в сторону обрамляющих его предгорных впадин и акваторий. Так, Западно-Кубанская впадина существенно сократилась в размерах и мигрировала на север, а втянутая в поднятие Восточно-Кубанская впадина практически не выражена в современном рельефе и сливается с западным склоном Ставропольского плато. Такое строение обусловлено коллизионными процессами, происходящими в восточном секторе Альпийского пояса. Пододвигание Закавказской (Малокавказской) области под ороген Большого Кавказа привело к образованию системы надвигов его южного склона с северным падением сместителей. Подобные надвиги фиксируются в центральной части орогена Северо-Западного и Центрального Кавказа. На фоне продольной зональности отчетливо проявляется и поперечная, что проявляется в очертаниях рельефа и конфигурации структурных форм, связанных с особенностями внутреннего геологического строения. В частности, это относится к Северо-Западному и Центральному сегментам, резко различающимся по внутреннему строению. На новейшем этапе развития были явно подновлены более древние продольные и поперечные разломы и сдвиговые зоны (см. рис. 1). Вдоль этих разломов часто выстраиваются эпицентры землетрясений, что указывает на их активизацию на современном этапе развития.

Проведенные структурно-тектонические полевые исследования показали, что вдоль северо-восточной границы горного сооружения Западного Кавказа выделяется серия нарушений, объединяемых в широкие Ахтырскую и Черкесскую флексурно-разрывные зоны. В свете новых геологогеофизических данных [Рогожин и др., 2014, 2015] эти нарушения объединяются вблизи поверхности в единую структуру, осложненную несколькими пологими взбросами и маскирующую реальное глубинное строение. В недрах флексуры подстилаются крутым взбросом, падающим к югу и внедряющимся к северу в разрез Предкавказского прогиба в виде клина на уровне контакта нижнеюрских пород и комплекса молассовых и платформенных толщ пермо-триаса | Золотов и др., 2001 |.

В последние годы с применением метода микросейсмического зондирования построены глубинные разрезы вдоль ряда профилей – Осетинского, Туапсинского, двух Эльбрусских, через Анапскую флексурно-разрывную зону, Молдаванскую и Ахтырскую флексурно-разрывные зоны, вкрест простирания Таманского п-ова и в районе Керченского пролива [Рогожин и др., 2014, 2015а, 6].

Особенность новейшей структуры горного сооружения Северо-Западного Кавказа – осложнение осевой части узкими, шириной в первые километры, шовно-депресионными зонами приразрывных грабенов | Несмеянов, 1992 |. Эти депрессии сформировались вдоль зон крупнейших разломов, сопровождаемых максимальной напряженностью деформаций альпийского комплекса, – Главного Кавказского надвига, Пшекиш-Тырныаузского, Красно-Полянского, Бекишейского и Семигорского. К ограничениям этих локальных прогибающихся структур приурочены разломы, в зонах которых обнаружены следы голоценовых сейсмотектонических смещений Rogozhin et al., 2004; Рогожин, Овсюченко, 2005; Рогожин и др., 2008, 2010, 2014]. О современной активности осевых депрессий свидетельствуют землетрясения относительно недавнего прошлого – Чхалтинское 1963 г. с M = 6.4, произошедшее в Бзыбско-Чхалтинской депрессии, и Тебердинское с *M* = 6.4, случившееся в 1905 г. в Домбайской депрессии.

Граница горного сооружения Кавказа и Черноморской впадины на всем протяжении представляет собой крутой флексуроподобный перегиб, осложненный многочисленными взбросо-надвигами | Мейснер, Туголесов, 1998 |. Такое их число в рельефе дна моря и приуроченность к сводам антиклиналей свидетельствуют о том, что рост складок в Туапсинском прогибе продолжается и в настоящее время. Разрывы также отчетливо выражены в рельефе, а в четвертичных осадках наблюдаются вертикальные смещения амплитудой до 1 км. На сейсмических разрезах суммарная амплитуда вертикального разрывного смещения подошвы четвертичного чехла в районе континентального склона достигает 2.2 км [Строение..., 1992]. Таким образом, разрывы Черноморской зоны обнаруживают весьма выразительные признаки молодой активности. На суше структуры Туапсинского прогиба проявляются в виде Сочи-Адлерской и Сухумской депрессий, вовлеченных в плиоцен-четверичное поднятие.

По данным высокоточного повторного нивелирования центральная часть горного сооружения испытывает поднятие со скоростью 2–7 мм/год, а Западно-Кубанский прогиб представляет собой область современного погружения со скоростью до 1 мм/год. Сочленение областей разнонаправленных вертикальных движений происходит в пределах Ахтырской флексурно-разрывной зоны, что характеризует ее как зону концентрации современных тектонических напряжений.

### Палеосейсмологические исследования

На рис. 4 отражена палеосейсмогеологическая изученность Западного Кавказа. Целенаправленные палеосейсмогеологические исследования на Кавказе начаты в конце 1960-х годов. Как правило, результаты исследований позволяли установить существование палеосейсмодислокаций без локализации очага древних сейсмических событий и определения их магнитуды и возраста Островский, 1970; Несмеянов и др., 1987; Белоусов и др., 2000]. Они использованы нами при составлении карты на рис. 4. Исключение составляют работы, проведенные под руководством В.П. Солоненко [Хромовских и др., 1979], в результате которых были сделаны первые оценки уровня магнитуды по палеосейсмодислокациям и локализовано несколько очаговых зон. В рассматриваемом регионе к ним относятся Бзыбская очаговая зона (обратный взброс с M = 7.2), Ненскра-Абакура (серия обратных взбросов и сбрососдвиг с M = 7.1 - 7.2) и Квира (сброс с M = 6.7).

Дальнейшие детальные исследования в этом направлении продолжены в рамках настоящей работы. На южном склоне и в осевой части Северо-Западного Кавказа, были выявлены потенциальные очаговые зоны с $M_{\rm макc}$  = 6.5–6.8 (Коцехурская и Кузнецовская на рис. 4) [Рогожин, Овсюченко, 2005; Рогожин и др., 2014, 2015а]; в районе Сочи-Красной Поляны установлен одноименный очаг с *M*<sub>макс</sub> = 7.3 [Рогожин и др., 2010]; в районе вулканической горы Эльбрус изучено две очаговые зоны (Чемарткольская и Адылсуйская) с  $M_{\text{макс}} = 6.5 - 7.0$ [Rogozhin et al., 2004; Рогожин и др., 2008, 2018]. Для подавляющего большинства этих очагов получены детальные характеристики их строения и долговременного сейсмического режима, необходимые для оценки сейсмической опасности. В последнее время на западном погружении Кавказа были детально изучены также Утришская и Гостагаевская очаговые зоны древних землетрясений. Показательны результаты палеосейсмологических исследований, проведенных в 2012-2018 гг. в Гостагаевской очаговой зоне, Анапской и Ахтырской флексурно-разрывных зонах.

В Гостагаевской очаговой зоне следы древнего землетрясения были выявлены в зоне Бабичевского новейшего разлома, выделенного ранее С.А. Несмеяновым | 1992 |. В рельефе разлом прослеживается вдоль левого борта р. Гостагайка в виде полигенетического, преимущественно тектонического уступа общей длиной около 9 км. Приповерхностное строение зоны разлома было изучено в специально пройденной канаве (рис. 5). В выработке обнаружен молодой разрыв сбросовой кинематики, четко приуроченный в рельефе к подножию уступа. Над разрывом происходит резкое изменение строения чехла рыхлых отложений, при этом в его опущенном крыле появляются грубообломочные (коллювиальные) отложения, налегающие на древний почвенный слой (палеопочву). Мощность коллювиальных образований достигает 40 см. Накопление

Вопросы инженерной сейсмологии 2019. Т. 46. №4. С. 57—74

Карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа...



Рис. 4. Карта палеосейсмогеологической изученности Западного Кавказа.

1 – палеосейсмодислокации по данным [Хромовских и др., 1979]; 2 – сейсмогравитационные структуры по данным полевых исследований и литературным сведениям [Островский, 1970; Несмеянов и др., 1987; Белоусов и др., 2000]; 3 – очаговые зоны древних землетрясений, для которых получены детальные характеристики авторами настоящей статьи

коллювиального клина, захоронившего палеопочву (фрагмент древней дневной поверхности) в опущенном крыле разрыва, указывает на резкий подъем в прошлом коренных пород на поверхность в виде уступа, с которого поступил обломочный материал. Вероятнее всего, это было связано с импульсной сейсмотектонической подвижкой по разрыву в результате выхода очага сильного землетрясения на поверхность. Вертикальная амплитуда подвижки сопоставима с мощностью коллювия вблизи разрыва – около 40 см. Радиоуглеродный возраст палеопочвы в опущенном крыле – 5630±70 лет (обр. А-2, лабораторный номер ИГАН 4085). Таким образом, в канаве оказались вскрыты следы очень древней подвижки, произошедшей около 5000-5500 л.н.

Полученная величина одноактного сейсмотектонического смещения и длина разрыва, выявленного в зоне Бабичевского новейшего разлома, соответствуют прогнозным  $M_{\rm макс}$ , полученным ранее для Михайловской зоны ВОЗ с применением формализованного внерегионального сейсмотектонического метода – 6.5–6.8 [Рогожин и др., 2001]. Кинематика прогнозных смещений – сбрососдвиг. Палеосейсмологические исследования по той же методике были выполнены для всех основных зон активных разломов региона: Ахтырской, Молдавановской, Неберджаевской, Бабичевской (северная ветвь), Супсехской, Марфовской, Утришской, Михайловской шовно-депресионной зоны приразрывных грабенов, Сочи– Краснополянской, Шаумяновской, Гогопсинской, Тугупсинской, Бекишейской, Владикавказской, Черматкольской, Кюкюртлинской, Краснополянской, Мзымтинской, Главного Кавказского разлома и др. [Рогожин и др., 2014, 2015а, 6, 2018].

# Построение карты зон ВОЗ

При построении карты зон ВОЗ Западного Кавказа определение и регионализация сейсмического потенциала  $(M_{\text{макс}})$  проводились тремя взаимодополняющими методами – палеосейсмогеологическим, традиционным и формализованным.



**Рис. 5.** Строение сейсморазрыва в зоне Бабичевского разлома в стенке канавы К-2. Зарисовка и фото фрагмента канавы на 10–14 м

1 – коренные породы (зеленовато-серые алевритистые мергели); 2 – темно-зеленые, плотные, тяжелые, пластичные глины; 3 – зеленовато-серые пылеватые суглинки; 4 – тектонические сместители. обр. А-2 – место отбора образца на радиоуглеродный анализ

Цифры в кружках: **1** – гумусовый горизонт современной почвы; **2** – светло-серые пылеватые суглинки с дресвой и щебнем; **3** – грубообломочные образования (глыбы, щебень, дресва мергелей) с зеленовато-серым суглинистым заполнителем; **4** – переотложенные темно-зеленые глины с фрагментами зеленовато-серых суглинков и палеопочвы; **5** – палеопочва; **6** – темно-зеленые, тяжелые, пластичные глины с фрагментами мергелей (горизонт склонового течения)

Результаты палеосейсмогеологических исследований описаны ранее в публикациях и суммированы на рис. 4.

По данным многолетних исследований традиционным методом, в рассматриваемом регионе выделены следующие сейсмогенерирующие структуры: Северная, Южная Крымско-Кавказская и Западно-Кавказская региональные краевые флексурно-разрывные зоны, а также Михайловская, Пшекиш-Тырныаузская и Мзымтинская шовно-депрессионные зоны, протягивающиеся вдоль осевой части Кавказа [Несмеянов, 1992]. Каждая сейсмогенерирующая структура принята в качестве осевого элемента зоны ВОЗ, ширина которой соответствует размерам очага максимального ожидаемого землетрясения. Максимальная оценка магнитуды составляет 6.5 для Южной Крымско-Кавказской зоны (Геленджикский сегмент). Для осевой (Михайловской) и Северной Крымско-Кавказской (Ахтырской) зон принята магнитуда 6.0. Для Пшекиш-Тырныаузской – 6.5. В Сочи-Краснополянском районе сейсмическая опасность определяется Мзымтинской зоной ВОЗ с  $M_{\text{макс}} = 7.0$  и Сочинским сегментом Южной Крымско-Кавказской зоны с  $M_{\text{макс}} = 6.0$  [Несмеянов и др., 2004].

Согласно методологии, разработанной для создания нормативных карт ОСР-97, в основу районирования сейсмической опасности положена ЛДФ-модель, которая содержит три основные структурные элемента – линеаменты, домены и потенциальные очаги (фокусы) землетрясений различных магнитуд [Уломов, Шумилина, 1999]. Этот метод выделения сейсмолинеаментов определенной протяженности, контролирующих сейсмические проявления разной энергии, успешно применяется при изучении сейсмической опасности крупных регионов, каким является, к примеру, Большой Кавказ и Предкавказье в целом [Balasanian et al., 1999].

В результате исследований с применением формализованного подхода оценка сейсмической опасности, проведенная на базе кластерного анализа комплекса геолого-геофизических и сейсмологических данных [Рейснер, Иогансон, 1993; Рогожин и др., 2001], показала, что сейсмотектонические зоны северного склона Северо-Западного Кавказа характеризуются в целом низким или умеренным уровнем сейсмической опасности –  $M_{\text{макс}} = 3.7-5.1$ . Территория Западного Предкавказья в целом характеризуется  $M_{\text{макс}} = 3.5-4.5$ , повышаясь на отдельных участках до  $M_{\text{макс}} = 5.5-6.0$ . В междуречье рек Пшиш и Псекупс оценки  $M_{\text{макс}}$  для северного склона Кавказа повышаются до  $M_{\text{макс}} = 6.8$ . Сейсмотектонические зоны южного склона и осевой части Западного Кавказа по расчетным данным значи-

тельно более сейсмоактивны. Сейсмический потенциал ожидаемых здесь землетрясений достигает  $M_{\text{макс}} = 6.8.$ 

Перечисленные расчетные оценки М<sub>макс</sub> были проверены в процессе полевых сейсмотектонических исследований на ключевых участках. Важнейшие результаты этих исследований опубликованы ранее. В итоге была составлена сводная карта зон ВОЗ для Западного Кавказа (рис. 6). Эта карта в корне отличается от карты сейсмолинеаментов региона | Уломов, Шумилина, 1999; Balasanian et al., 1999] своей детальностью, более высокой дробностью оценок  $M_{\text{макс}}$  и приуроченностью зон ВОЗ к реальным тектоническим нарушениям разных рангов, проявляющим активность на новейшем этапе. Именно эта карта положена в основу построения новой детальной карты сейсмической опасности Северо-Западного и Центрального Кавказа.

# Построение карт сейсмической опасности

На основе карты зон ВОЗ (см. рис. 6) были составлены карты сейсмической опасности в детальном масштабе для региона Северо-Западного Кавказа в терминах и по методике построения карт



**Рис. 6.** Карта зон ВОЗ Западного Кавказа с эпицентрами землетрясений по инструментальным и историческим данным Цифрами указаны *М<sub>макс</sub>* зон ВОЗ

Северная широта.		Восточная долгота, град.											
град.	35.75	36.00	36.25	36.50	36.75	37.00	37.25	37.50	37.75	38.00	38.25	38.50	38.75
43.17	0.005	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.003	0.005
43.33	0.003	0.005	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.019
43.50	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.006	0.029
43.67	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.006	0.043
43.83	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.017	0.02	0.006	0.043
44.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.014	0.014	0.001	0.001	0.02	0.025	0.01	0.031
44.17	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.014	0.029	0.017	0.005	0.005	0.006	0.005	0.019
44.33	0.001	0.003	0.003	0.001	0.012	0.017	0.078	0.092	0.022	0.003	0.003	0.003	0.014
44.50	0.003	0.006	0.006	0.006	0.041	0.071	0.124	0.107	0.03	0.026	0.015	0.003	0.012
44.67	0.003	0.005	0.007	0.039	0.107	0.186	0.171	0.063	0.023	0.035	0.015	0.012	0.014
44.83	0.001	0.002	0.009	0.041	0.083	0.145	0.127	0.04	0.015	0.01	0.004	0.012	0.014
45.00	0.001	0.001	0.005	0.01	0.01	0.033	0.032	0.011	0.031	0.024	0.001	0.001	0.001
45.16	0.001	0.001	0.001	0.002	0.017	0.034	0.019	0.015	0.043	0.04	0.013	0.001	0.001
45.33	0.001	0.001	0.002	0.002	0.012	0.015	0.008	0.018	0.017	0.016	0.012	0.003	0.005
45.50	0.012	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.009	0.009	0.001	0.001	0.001	0.003	0.008
45.66	0.012	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004	0.004	0.001	0.003	0.003	0.001	0.006

Таблица 1. Матрица сейсмической активности A<sub>3.3</sub> в системе географических координат для Северо-Западного сегмента Кавказа, b = 0.813

**Таблица 2.** Матрица сейсмической активности А<sub>3.3</sub> в системе географических координат для Юго-Западного сегмента Кавказа, b = 0.85

Северная широта.		Восточная долгота, град.											
град.	38.5	38.75	39	39.25	39.5	39.75	40	40.25	40.5	40.75	41	41.25	41.5
42.83	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.036	0.039	0.002	0.002	0.014	0.02
43.00	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.007	0.007	0.01	0.03	0.038	0.024
43.16	0.016	0.018	0.016	0.019	0.014	0.01	0.016	0.016	0.007	0.019	0.06	0.083	0.109
43.33	0.016	0.034	0.038	0.027	0.028	0.037	0.13	0.127	0.02	0.028	0.081	0.116	0.147
43.5	0.005	0.027	0.041	0.024	0.029	0.068	0.161	0.149	0.048	0.038	0.069	0.097	0.075
43.66	0.005	0.029	0.057	0.05	0.036	0.056	0.064	0.077	0.072	0.038	0.074	0.097	0.058
43.83	0.005	0.034	0.068	0.063	0.059	0.096	0.084	0.071	0.055	0.02	0.055	0.064	0.039
44.00	0.012	0.021	0.041	0.045	0.054	0.094	0.072	0.031	0.016	0.003	0.003	0.015	0.031
44.16	0.007	0.005	0.012	0.033	0.053	0.034	0.007	0.101	0.097	0.005	0.007	0.018	0.042
44.33	0.001	0.013	0.013	0.016	0.038	0.022	0.01	0.107	0.099	0.007	0.007	0.008	0.019
44.50	0.001	0.014	0.027	0.014	0.001	0.001	0.023	0.023	0.016	0.018	0.002	0.006	0.006
44.66	0.016	0.018	0.018	0.016	0.001	0.002	0.018	0.016	0.016	0.018	0.002	0.003	0.005
44.83	0.016	0.018	0.004	0.007	0.005	0.002	0.002	0.001	0.002	0.004	0.002	0.005	0.01
45.00	0.001	0.001	0.001	0.007	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.014	0.016	0.007
45.16	0.001	0.001	0.002	0.018	0.016	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.027	0.027	0.002
45.33	0.003	0.005	0.004	0.016	0.014	0.014	0.016	0.002	0.001	0.001	0.014	0.014	0.001



Таблица 3. Матрица сейсмическо	эй активности А <sub>з.з</sub> в системе	географических і	координат для	Центрального
сегмента Кавказа, b = 0.907				

Северная широта,						Вост	очная д	олгота,	, град.										
град.	37.75	38.00	38.25	38.50	38.75	39.00	39.25	39.50	39.75	40.00	40.25	40.50	40.75	41.00					
43.50	0.001	0.001	0.002	0.005	0.026	0.05	0.033	0.028	0.06	0.16	0.152	0.043	0.034	0.089					
43.67	0.001	0.001	0.002	0.005	0.039	0.076	0.055	0.032	0.067	0.074	0.08	0.074	0.023	0.067					
43.83	0.001	0.015	0.018	0.005	0.04	0.072	0.057	0.052	0.084	0.062	0.05	0.047	0.017	0.037					
44.00	0.001	0.018	0.022	0.009	0.029	0.062	0.053	0.06	0.086	0.044	0.015	0.025	0.025	0.014					
44.17	0.004	0.004	0.005	0.004	0.018	0.038	0.049	0.057	0.042	0.018	0.107	0.112	0.017	0.008					
44.33	0.02	0.003	0.001	0.001	0.013	0.013	0.025	0.037	0.013	0.009	0.098	0.092	0.006	0.006					
44.50	0.028	0.025	0.012	0.001	0.011	0.022	0.014	0.004	0.002	0.017	0.017	0.013	0.013	0.001					
44.67	0.021	0.032	0.014	0.011	0.013	0.015	0.015	0.002	0.002	0.015	0.015	0.025	0.025	0.002					
44.83	0.013	0.008	0.003	0.011	0.013	0.004	0.006	0.005	0.015	0.002	0.002	0.013	0.013	0.002					
45.00	0.028	0.022	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.011	0.023					
45.16	0.039	0.037	0.012	0.001	0.001	0.002	0.016	0.014	0.001	0.001	0.001	0.001	0.011	0.034					
45.33	0.016	0.015	0.011	0.002	0.004	0.004	0.014	0.012	0.011	0.013	0.002	0.001	0.001	0.011					
45.50	0.001	0.001	0.001	0.002	0.007	0.004	0.001	0.001	0.011	0.014	0.002	0.001	0.001	0.001					
45.66	0.001	0.002	0.002	0.001	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001					
45.83	0.001	0.002	0.005	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001					
46.00	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001					

**Таблица 4.** Матрица сейсмической активности  $A_{3.3}$  в системе географических координат для восточной части Центрального сегмента Кавказа, *b* = 0.942

Северная широта,			Восточная долгота, град.											
град.	40.5	40.75	41.00	41.25	41.50	41.75	42.00	42.25	42.50	42.75	43.00	43.25	43.50	
43.68	0.07	0.017	0.05	0.08	0.051	0.018	0.002	0.011	0.009	0.024	0.107	0.119	0.069	
43.85	0.039	0.005	0.01	0.029	0.031	0.011	0.011	0.022	0.025	0.046	0.171	0.16	0.036	
44.01	0.018	0.012	0.003	0.011	0.022	0.02	0.076	0.069	0.073	0.087	0.103	0.094	0.012	
44.18	0.082	0.015	0.008	0.013	0.029	0.029	0.073	0.089	0.091	0.073	0.037	0.032	0.028	
44.34	0.066	0.006	0.006	0.008	0.015	0.013	0.019	0.065	0.08	0.069	0.039	0.004	0.031	
44.51	0.011	0.011	0.001	0.006	0.006	0.002	0.019	0.048	0.046	0.052	0.037	0.004	0.008	
44.67	0.02	0.02	0.002	0.002	0.006	0.017	0.02	0.024	0.024	0.007	0.001	0.002	0.002	
44.84	0.011	0.011	0.002	0.004	0.012	0.03	0.032	0.022	0.018	0.005	0.001	0.002	0.004	
45.00	0.001	0.009	0.019	0.011	0.006	0.013	0.017	0.012	0.006	0.013	0.011	0.002	0.004	
45.17	0.001	0.009	0.028	0.019	0.001	0.001	0.011	0.021	0.011	0.013	0.011	0.001	0.001	
45.33	0.001	0.001	0.009	0.009	0.001	0.002	0.013	0.021	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	
45.50	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.009	0.009	0.001	0.001	
45.66	0.001	0.001	0.001	0.009	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.009	0.009	0.001	0.001	
45.83	0.001	0.001	0.001	0.009	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
46.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
46.17	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	

ОСР-97 А и В. При этом было признано оправданным при расчетах сейсмической опасности в баллах нормативной макросейсмической шкалы MSK-64 (в настоящий момент действует новая макросейсмическая шкала ШСИ-2017 (см.: ГОСТ Р 57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности»), полностью унаследовавшая оценки воздействий в баллах от шкалы MSK-64) использовать непосредственно уравнение макросейсмического поля для Кавказского региона [Сейсмическое..., 1980].

Поясним общие принципы построения этих карт. Карты сейсмической опасности в детальном масштабе для региона Северо-Западного и Центрального секторов Большого Кавказа строились на основе расчета сейсмической сотрясаемости [Сейсмическая сотрясаемость ..., 1979] по детальной сетке с размером ячеек 10' (0.165°) по широте × 15' (0.25°) по долготе. При расчетах использовалась матрица  $M_{\rm макс}$ , являющаяся цифровым аналогом карты зон ВОЗ, а также матрицы сейсмической активности (табл. 1–4) для четырех перекрывающихся сегментов Северо-Западного и Центрального Кавказа, для которых сейсмический режим изучался раздельно. Каждый из рассмотренных сегментов Большого Кавказа имел свой наклон графика повторяемости (параметр b), причем значения параметра b несколько различались между собой.

Расчет сейсмической сотрясаемости в каждой данной точке (ячейке матрицы сотрясаемости) осуществляется путем численного интегрирования сейсмических воздействий в этой точке от всех сейсмических источников (ячейки матрицы



**Рис. 7.** Карта ДСР-А Северо-Западного Кавказа с 10%-ной вероятностью превышения в течение 50 лет. Средний период повторения 500 лет



**Рис. 8.** Карта ДСР-В Северо-Западного Кавказа с 5%-ной вероятностью превышения в течение 50 лет. Средний период повторения 1000 лет

 $M_{\text{макс}}$ ) на рассматриваемой территории с учетом средней частоты повторения в них землетрясений различных магнитуд (ячейки матрицы сейсмической активности) от низшей представительной вплоть до  $M_{\text{макс}}$ . При этом средняя частота повторения землетрясений с магнитудами  $M \le M_{\text{макс}}$  определяется в каждой ячейке матрицы  $M_{\text{макс}}$  по величине сейсмической активности  $A_{3.3}$  в этой ячейке и наклону графика повторяемости [Сейсмическая сотрясаемость..., 1979].

При расчетах использовалось уравнение макросейсмического поля, применяемое для Кавказа:

$$I = 1.5 M_{\rm s} - 3.5 \lg R + 3.0$$

где R – расстояние между гипоцентром землетрясения и точкой наблюдения, т.е.  $R = \sqrt{(\Delta^2 + h^2)}$ (здесь  $\Delta$  и h – соответственно эпицентральное расстояние и глубина очага в километрах).

Расчет сейсмической сотрясаемости  $(B_1)$  проводился по программе расчета сейсмической сотрясаемости, в которой используются матрица  $M_{\rm макс}$ ; матрица сейсмической активности  $A_{3,3}$ ; наклон графика повторяемости *b* и средняя глубина сейсмоактивного слоя, выбиравшаяся в соответствии с региональными распределениями гипоцентров по глубине и из соображений предельной (наименьшей возможной) глубины очага для соответствующих магнитуд  $M_{\rm макс}$  [Шебалин, 1969]. На рис. 7, 8 приводятся полученные карты сейсмической опасности для Северо-Западного и Центрального секторов Большого Кавказа.

#### Заключение

На основе проведенных детальных сейсмотектонических и палеосейсмологических исследований и обобщения имеющихся литературных данных были составлены карты сейсмической опасности для территорий Северо-Западного и Центрального Кавказа. На составленных картах Северо-Западный и Центральный сегменты Большого Кавказа выглядят сейсмоопасной областью, где уровень сейсмических воздействий достигает 8.5 баллов по картам А и В (в терминах карты ОСР-97). Напомним, что карта А составлена для оценки сейсмической опасности для строительных объектов нормальной и пониженной ответственности, а карта В – для объектов повышенной ответственности. В то же время, по сравнению с соответствующими фрагментами карты ОСР-97 [Уломов, Шумилина, 1999], полученные результаты выглядят более дифференцированно и в целом заметно понижают уровень сейсмической опасности региона. Это представляется очень существенным на фоне активного хозяйственного освоения территории в ходе проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводных систем высокого давления.

# ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты КОМФИ № 18-00-00344 и № 18-00-00247).

# ЛИТЕРАТУРА

- Белоусов Т.П., Шолохов В.В., Энман С.В. Геодинамика и сейсмотектоника Ставропольского края. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 184 с.
- Горелов С.К. Тектонические движения Азово-Кубанской равнины в голоцене по данным изучения отложений и морфологии речных пойм // Материалы Всесоюз. совещ. по изучению четвертичного периода. М., 1961. Т. 2. С. 72–82.
- Золотов Е.Е., Кадурин И.Н., Кадурина Л.С., Недядько В.В., Ракитов В.А., Рогожин Е.А., Ляшенко Л.Л. Новые данные о глубинном строении земной коры и сейсмичности Западного Кавказа // Геофизика XXI столетия: 2001 год. М.: Науч. мир, 2001. С. 85–89.
- Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во Моск. унта, 1999. 384 с.
- Костенко Н.П., Панина Л.В. Позднеорогенная структура Предкавказья // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2001. № 1. С. 11–20.
- Лилиенберг Д.А., Кафтан В.И., Кузнецов Ю.Г., Серебрякова Л.И. Картографические модели вариаций современных тектонических движений морфоструктур Кавказа и Закавказья для разных эпох // Геоморфология. 1997. № 4. С. 63–75.
- Аутиков А.И., Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н. Методика оценки сейсмической опасности на стадии уточнения исходной сейсмичности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Третьей междунар. сейсмол. школы. Кисловодск, 20–24 октября 2008 г. Кисловодск, 2008. С. 81–86.
- Мейснер Л.Б., Туголесов Д.А. Туапсинский прогиб впадина с автономной складчатостью // Геотектоника. 1998. № 5. С. 76–86.
- *Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. М.: Недра, 1992. 254 с.
- Несмеянов С.А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Науч. мир, 1999. 391 с.
- Несмеянов С.А. Детальное морфоструктурное районирование и новейшие шовные зоны Большого Кавказа // Проблемы геоморфологии и геологии Кавказа и Предкавказья: Материалы Междунар. совещ. «Геоморфология гор и равнин: Взаимосвязи и взаимодействие». XXIV пленум Геоморфологической комиссии РАН. Краснодар, 2001. С. 72–78.

- Несмеянов С.А., Шмидт Г.А., Щеглов А.П. Морфоструктурное положение сейсмодислокаций Южного склона Западного Кавказа // Геоморфология. 1987. № 3. С. 74–78.
- Несмеянов С.А., Рогожин Е.А., Севостьянов В.В., Воейкова О.А. Прогноз возможных сейсмотектонических смещений по активным разрывам Северо-Западного Кавказа на трассе магистрального трубопровода «Голубой поток» // Геоэкология. 2004. № 4. С. 351–360.
- Островский А.Б. Палеосейсмотектонические дислокации на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа в связи с оценкой современной сейсмической опасности этой территории // Комплексные исследования Черноморской впадины. М.: Наука, 1970. С. 46–58.
- Попков В.И. Тектоника Северо-Западного Кавказа // Изв. Отд. наук о Земле и природных ресурсов АН Республики Башкортостан. Сер. Геология. 2007. № 11. С. 13–18.
- Пустильников М.Р., Чекунов А.В. Индоло-Кубанский передовой прогиб // Геофизические исследования и тектоника юга Европейской части СССР. Киев: Наук. думка, 1969. С. 190–210.
- Рейснер Г.И., Йогансон Л.И. Сейсмический потенциал Западной России, других стран СНГ и Балтии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1993. С. 186–195.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н. Сейсмическая и геологическая активность тектонических нарушений Северо-Западного Кавказа // Физика Земли. 2005. № 6. С. 29–42.
- Рогожин Е.А. Овсюченко А.Н. Сейсмотектоническая позиция Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. // Наука и образование в Чеченской Республике: Достижения и перспективы развития: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 10-летию со дня основания КНИИ РАН. Грозный: КНИИ РАН, 2011. С. 378–381.
- Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Овсюченко А.Н. Активные разломы и глубинное строение зоны Керченского пролива // Геология и геофизика юга России. 20156. № 1. С. 63–66.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В. Дислокации сильнейших древних землетрясений Приэльбрусья // Докл. АН. 2008. Т. 422, № 1. С. 98–101.
- Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами // Геофизика и математика XXI: Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 279–299.
- Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Николаев А.В. Особенности глубинного строения и геологической активности горы

Эльбрус и участка ущелья Эльбрус–Тырныауз по комплексу геолого-геофизических данных // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 471, № 3. С. 11–14.

- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Шварев С.В., Мараханов А.В., Новиков С.С. Особенности сейсмотектоники Сочи-Краснополянского района // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Пятой междунар. сейсмол. школы. г. Владикавказ, 2010. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 174–178.
- Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсюченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // Геотектоника. 2015а. № 2. С. 36–49.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
- Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Горбатиков А.В. Глубинное строение, режим вулканической и сейсмической активности Приэльбрусья // Геотектоника. 2018. № 6. С. 69–81.
- Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. 308 с.
- Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 190 с.
- Строение и эволюция земной коры Черного моря / Б.С. Вольвовский, В.Б. Соллогуб, И. Финетти и др. М.: Наука, 1992. 88 с.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. М. 1 : 8 000 000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
- Хромовских В.С., Солоненко В.П., Семенов Р.М., Жилкин В.М. Палеосейсмогеология Большого Кавказа. М.: Наука, 1979. 188 с.
- Шебалин Н.В. О предельной магнитуде и предельной балльности землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969. № 1.
- Balasanian S., Ashirov T., Chelidze T. et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // Ann. Geof. 1999. V. 42, N 6. P. 1139–1152.
- Rogozhin E.A., Gurbanov A.G., Marakhanov A.V., Ovsyuchenko A.N., Spiridonov A.V., Burkanov E.E. Ancient earthquake dislocations in the area of Elbrus Volcano, North Caucasus // Rus. J. Earth Sci. 2004. V. 6, N 4. http://rjes.wdcb.ru/v06/tje04160/ tje04160.htm
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. V. 84, N 4. P. 974–1002.

Вопросы инженерной сейсмологии 2019. Т. 46. №4. С. 57—74

# Сведения об авторах:

АКИМОВ Валерий Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (Федеральный центр науки и высоких технологий) (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)). Россия, 121352, г. Москва, ул. Давыдковская, д. 7. Тел.: +7 (985) 928-42-19. Е-mail: akimov@vniigochs.ru

**ЗАЙЦЕВ Владимир Алесандрович** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (916) 552-79-04. Е-mail: v.zaitsev@mail.ru

**ЛАРЬКОВ Александр Сергеевич** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-92-50. E-mail: las119@yandex.ru

**ЛУТИКОВ Александр Иванович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-99-50. E-mail: ail@ifz.ru

**ОВСЮЧЕНКО Александр Николаевич** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-90-15. E-mail: ovs@ifz.ru

ПАНИНА Людмила Викторовна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7 (917) 519-54-40. Е-mail: panina53@mail.ru

**РОГОЖИН Евгений Александрович** - доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-87-15. E-mail: eurog@ifz.ru

**РОДИНА Светлана Николаевна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-92-50. E-mail: rodina@ifz.ru

**СЫСОЛИН Александр Иванович** - научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-53-50. E-mail: alexandr.sysolin@gmail.com

# SEISMIC HAZARD MAPS OF THE NORTH-WEST AND CENTRAL CAUCASUS ON A DETAILED SCALE

V.A. AKIMOV<sup>1</sup>, V.A. ZAITSEV<sup>2</sup>, A.S. LARKOV<sup>3</sup>, A.I. LUTIKOV<sup>3</sup>, A.N. OVSYUCHENKO<sup>3</sup>, L.V. PANINA<sup>2</sup>, E.A. ROGOZHIN<sup>3</sup>, S.N. RODINA<sup>3</sup>, A.I. SYSOLIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Civil Defense and Disaster Management All Russian Science Research Institute Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergency and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Federal Center of Science and High Technologies) (FC VNII GoChS Emercom of Russia), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Corresponding author: E.A. Rogozhin, e-mail: eurog@ifz.ru

**Abstract.** The results of a new generalization of data on seismic hazard of the Northwest and Central sectors of the Greater Caucasus are presented. A fundamentally new model of the seismotectonic basis for the seismic hazard map of the region has been prepared. On the basis of this model calculations of seismic influences on a probabilistic basis are made. The work included three stages. At the first stage, seismotectonic studies were carried out, as a result of which a seismotectonic model was created and a map of the zones of possible centers of earthquakes was compiled. At the second stage, seismicity and seismic mode were studied in detail. The third stage included the calculation of the frequency of seismic shakes of various intensities in the study area based on the parameters of the macroseismic field equation, seismic activity patterns, zones of possible earthquake sources and the slope of the frequency of the earthquakes. As a result,

seismic hazard maps were compiled. The northwestern and central segments of the Greater Caucasus look like a seismic hazardous area, where the level of seismic impacts reaches 8.5 points on maps A and B. At the same time, in comparison with the data from the OSR-97 and OSR-2015 maps, the results obtained look more differentiated and generally significantly reduce the level of seismic hazard in the region. The work is important from a methodological point of view in the light of seismic risk management of this densely populated and actively developed territory of Russia.

**Keywords:** earthquakes, seismic hazard assessment, Caucasus, seismotectonics, paleoseismogeology, seismic shaking, seismic regime.

# **ABOUT THE AUTHORS:**

AKIMOV Valery Alexandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Civil Defense and Disaster Management All Russian Science Research Institutu Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergency and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Federal Center of Science and High Technologies) (FC VNII GoChS Emercom of Russia). Russia, 121352, Moscow, Davydkovskaya st., 7. Tel.: +7 (985) 928-42-19. E-mail: akimov@vniigochs.ru

**ZAITSEV Vladimir Alexandrovich** – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskye Gory, 1. Tel.: +7 (916) 552-79-04. E-mail: v.zaitsev@mail.ru

LARKOV Alexander Sergeevich – Science Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (499) 254-92-50. E-mail: las119@yandex.ru

**LUTIKOV Alexander Ivanovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (499) 254-99-50. E-mail: ail@ifz.ru

**OVSYUCHENKO Alexander Nikolaevich** – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (499) 254-90-15. E-mail: ovs@ifz.ru

**PANINA Lyudmila Viktorovna** – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskye Gory, 1. Tel.: +7 (917) 519-54-40. E-mail: panina53@mail.ru

**ROGOZHIN Evgeny Alexandrovich** – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Department, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (499) 254-87-15. E-mail: eurog1947@yandex.ru

**RODINA Svetlana Nikolaevna** – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (499) 254-92-50. E-mail: rodina@ifz.ru

**SYSOLIN Alexander Ivanovich** – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st., 10-1. Tel.: +7 (499) 254-53-50. e-mail: alexandr.sysolin@gmail.com

**Cite this article as**: Akimov V.A., Zaitsev V.A., Larkov A.S., Lutikov A.I., Ovsyuchenko A.N., Panina L.V., Rogozhin E.A., Rodina S.N., Sysolin A.I. Seismic hazard maps of the North-West and Central Caucasus on a detailed scale, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology). 2019. V. 46, No. 4. P. 57–74 [in Russian]. https://doi.org/10.21455/VIS2019.4-4

English translation of the article will be published in *Seismic Instruments*, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), https://link.springer.com/journal/11990