

«Важно понимать, что вам не нужно уметь предсказывать землетрясения, чтобы спасти человеческие жизни. Вы можете спасти их только путем строительства зданий, которые способны выстоять от ударов землетрясений. Людей убивают не землетрясения, а дома».

Джеймс Джексон, глава Департамента наук Кембриджского университета

УДК 551.248(571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-16-29

Возможности оценки сейсмической опасности природного и техногенного риска агломерации «Большого Якутска»

В.С. Имаев^{*,**}, Л.П. Имаева^{*}, Б.М. Козьмин^{**}, А.Ф. Петров^{***},
С.В. Шибаев^{***}, Н.Н. Гриб^{****}, И.И. Колодезников^{*****}

^{*}Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

^{**}Институт алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

^{***}Якутский филиал Федерального исследовательского центра
Единой геофизической службы РАН, Якутск, Россия

^{****}Технический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, Нерюнгри, Россия

^{*****}Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия
imaev@crust.irk.ru

Аннотация. На основе сейсмотектонических и геофизических материалов дешифрирования аэрокосмоснимков изучена современная геодинамика Лено-Алданского плато, на котором расположена агломерация «Большого Якутска». Установлен ряд разломов (Якутский, Кангаласский, Табагинский и др.), современная активность которых подтверждается приуроченностью к ним эпицентров землетрясений с интенсивностью 4–6 баллов. Приводится морфокинематическая характеристика этих тектонических нарушений. Представлены расчеты вероятности повторения сильных сейсмических воздействий (от 5 до 8 баллов) в районе самого г. Якутска. Рассматривается понятие сейсмического риска, методы оценки природных и техногенных катастроф, которые могут возникать при хозяйственном освоении долины р. Лены, что связано с увеличением темпов застройки и промышленного прессинга на экологическую среду долины Туймаады, где расположен г. Якутск. Предложены первоочередные мероприятия, необходимые для снижения риска.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмический риск, землетрясения, разломы, сейсмическое районирование.

Благодарности. Данное научное исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №19-05-00062 программы комплексной научной экспедиции, финансируемой Правительством Республики Саха (Якутия) в 2016–2020 гг., а также проекта ИГАиБМ СО РАН (№ 0381-2616-0001).

Possibilities of seismic danger estimation of natural and technogenic risk of «Yakutsk city» agglomeration

V.S. Imaev^{*,**}, L.P. Imaeva^{*}, B.M. Kozmin^{**}, A.F. Petrov^{***},
S.V. Shibaev^{***}, N.N. Grib^{****}, I.I. Kolodeznikov^{*****}

^{*}*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

^{**}*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

^{***}*Yakutsk Branch of the Federal Research Center of the Unified Geophysical Service RAS, Yakutsk, Russia*

^{****}*Technical Institute (Branch) of M.K. Ammosov NEFU, Neryungry, Russia*

^{*****}*Academy of Sciences of Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia*

imaev@crust.irk.ru

Abstract. Modern geodynamics of the Lena-Aldan plateau, wherein the «Yakutsk city» agglomeration is located, is studied on the basis of seismotectonic and geophysical data as well as interpretation of aerial and space photos. A number of active faults are recognized (Yakutsk, Kangalassy, Tabaga, etc.), to which epicenters of earthquakes with an intensity of 4–6 are confined. Morphological-kinematic characteristics of these tectonic dislocations are given. Calculations of probable recurrence rate of strong (5–8 in intensity) seismic events in the area of Yakutsk are presented. The notion of seismic risk and methods of assessment of natural and technogenic disasters are considered that may arise during the economic development of the Lena River valley, which is associated with an increase of paces of construction and industrial pressure on the ecology of Tuymaada Valley, where Yakutsk is located. Priority measures necessary for risk reduction are proposed.

Key words: seismic danger, seismic risk, earthquakes, faults, seismic zoning.

Acknowledgments. This scientific study was carried out with the support of a grant from Russian Foundation for Basic Research (No. 19-05-00062) and complex scientific expedition funded by the Government of the Sakha Republic (Yakutia) in 2016–2020, and also the project of the Diamond and Precious Metal Geology Institute (DPMGI) SB RAS (No. 0381-2616-0001).

Введение

Первые исторические сведения о землетрясениях в Якутии относятся к XVIII–XIX столетиям, когда в «Каталоге землетрясений Российской империи» было помечено: «Землетрясения в Якутске в 1770 и 1849 гг. и в Верхоянске в 1877 г.» и далее «1849 год 2 июля – землетрясение в Якутском остроге: раскачивались лампы перед образами, колыхалось пламя свечей, трещали стены домов». Землетрясение повторилось ещё 5 июля с силой в 3–4 балла и ощущалось в Олекминске и по Вилюю [1].

Недавно были обнаружены местные архивные материалы, дополняющие данные этого каталога. Во время сооружения каменного здания Никольской церкви, которое строилось более 30 лет, в г. Якутске было отмечено ощутимое землетрясение. Под его воздействием «фундамент возводимого храма «поплыл» в разные стороны, а в его основании появились сильные трещины и после обследования по решению комиссии в 1835 г. было решено снести постройку» [<http://vecherka.ykt.ru>]. Судя по этим описаниям, интенсивность названных явлений могла достигать 4–6 баллов по шкале MSK-64 [2].

Другое событие уже произошло в 1951 г. в хр. Сетте-Дабан в 370 км к востоку от г. Якутска. Сила данного землетрясения в его эпицентре достигала 7 баллов. Оно ощущалось на площади свыше 200 км² и замечено населением в ряде населённых пунктов: Усть-Мае, Охотском Перевозе, Огоньке и др. В г. Якутске были колебания в 3–4 балла [3].

Согласно современным данным, приведённым в Internet-порталах, в г. Якутске отмечен значительный рост городского населения (его численность в 2017 г. составила 307 тыс., 30 % от всего населения Республики Саха (Якутия), и возросла за последние 20 лет на 90 тыс. человек).

Об этом убедительно свидетельствует схема распределения числа жителей на 100 км² (рис. 1). Легко заметить, что наибольшая плотность населения приходится на центральные районы Якутии (более 600 чел./100 км²) с центром в г. Якутске.

С начала XXI века здесь фиксируется активная миграция сельского населения в город. В результате г. Якутск по классификации «Градостроительного комплекса РФ» относится в насто-

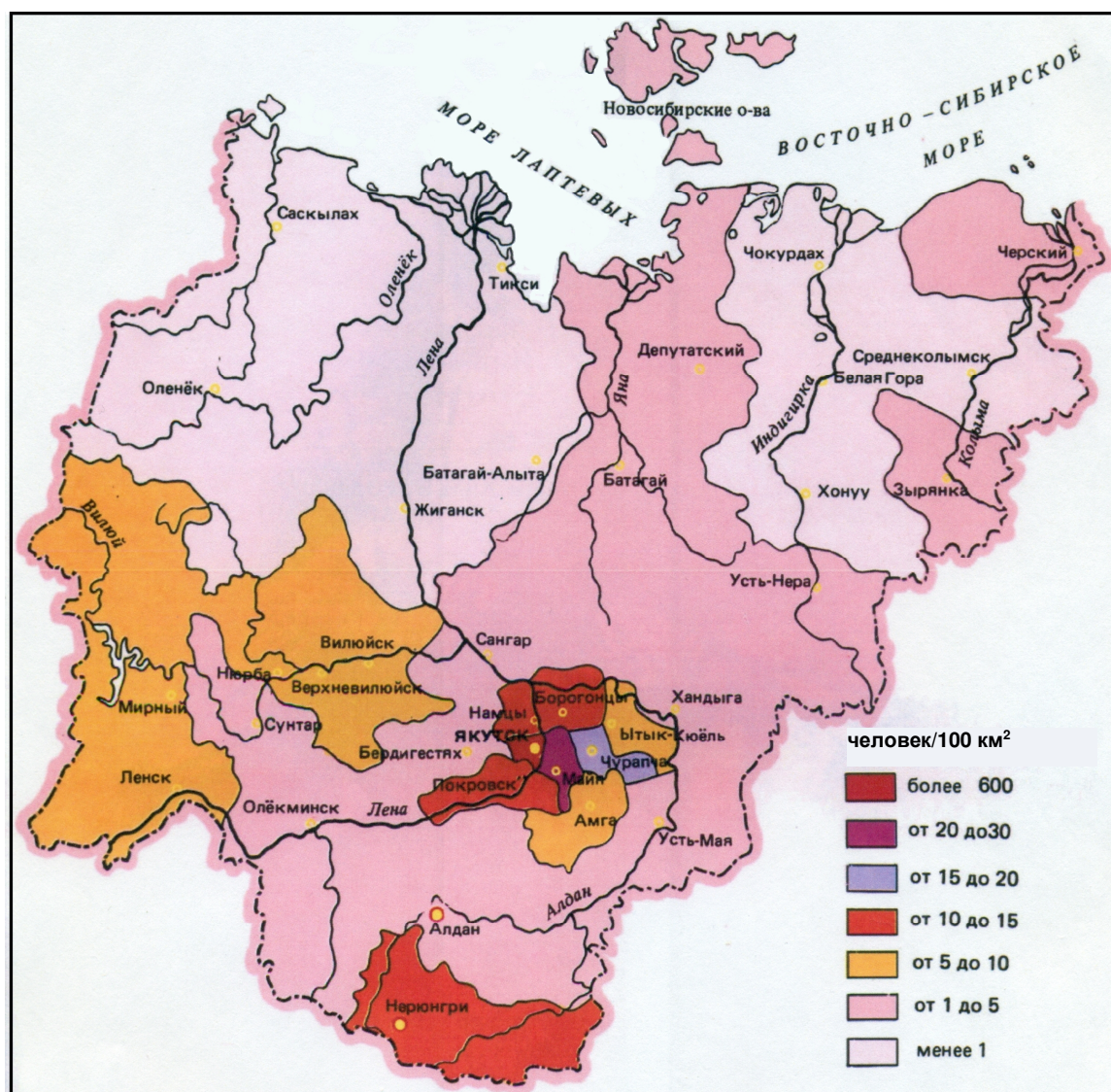


Рис. 1. Распределение плотности населения Республики Саха (Якутия)[sakha.gov.ru]

Fig. 1. Distribution of population density of Republic of Sakha (Yakutia) [sakha.gov.ru]

ящее время к крупным урбанизированным территориям. Урбанизация сопровождается активным городским строительством (появились новые 202-й, 203-й жилые кварталы, построенные на намывных песках на пойменных террасах р. Лены, возникли участки уплотнённой застройки в центре города с увеличением соответственно плотности населения). Администрация городского округа «Город Якутск» установила новые местные нормативы градостроительного проектирования от 25.02.2016 г. № 278-НПА, разрешающие повышение расчётных показателей интенсивности использования жилых территорий в городском округе, в частности увеличения средней этажности многоквартирных блокированных жилых домов до 8–16 этажей. Процесс такой активной урбанизации территории ставит перед городом ряд острых проблем по экологии

(уязвимость городских систем, миграция и концентрация населения, низкое качество среды обитания, удаление отходов, растепление слоя вечной мерзлоты и нарушения его целостности, связанное с плотностью застройки жилых зданий и соответственно увеличением многочисленных протечек горячей воды и прочим коммунальным авариям).

Неожиданно остро приобретают значение вопросы сейсмобезопасности территории, которая до недавнего времени относилась к малоактивным районам платформы, исключаящей какую-либо угрозу для жизнедеятельности городской среды г. Якутска.

Сейсмической станцией в г. Якутске и сетью цифровых сейсмостанций Якутского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (ЯФ ФИЦ ЕГС

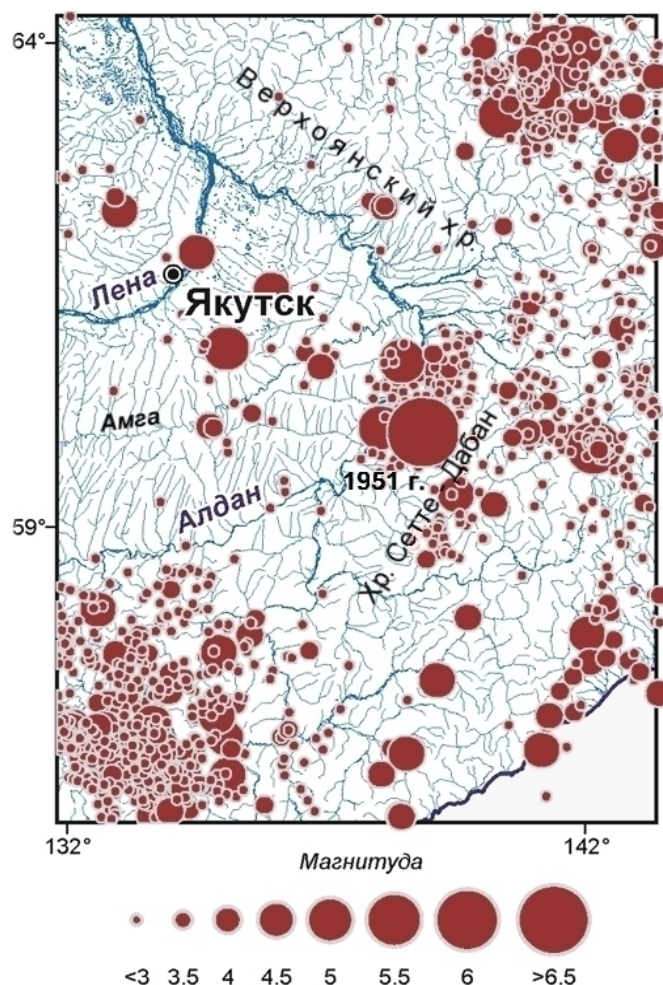


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений г. Якутска с магнитудой $M=3-6,5$ (радиус 500 км). Наибольший круг – эпицентр Сетте-Дабанского землетрясения, рядом проставлена дата его возникновения [3–5]

Fig. 2. Map of epicenters of earthquakes in Yakutsk with magnitude $M=3-6,5$ (radius is 500 km). Largest circle is epicenter of Sette-Daban earthquake, next to date of its occurrence [3–5]

РАН) с 1957 г. по настоящий период зарегистрировано около 200 близких сейсмических событий различной интенсивности в радиусе 500 км от города (рис. 2) [4, 5]. В г. Якутске отмечены макросейсмические (до 6 баллов) эффекты как от местных близких, так и транзитные сотрясения от удаленных сильных (8–9 баллов) землетрясений.

К наиболее сейсмоактивным вблизи агломерации «Большого Якутска» относятся горные сооружения хребтов Верхоянского и Сетте-Дабан, а также Алданского нагорья и Лено-Алданского плато, на котором расположен г. Якутск.

Один из самых близких к городским кварталам подземный толчок произошёл 13 июля 1979 г. в 15 ч (магнитуда $M=4,5$; энергетический класс $K=12$) в 40 км к северо-северо-востоку от г. Якутска (район Кангаласской протоки). В его эпицентре наблюдались 5–6-балльные эффекты:

в тихую погоду резко качались деревья, как при сильном ветре; люди у костра в испуге вскакивали с земли, слышался глухой гул [3]. При эксплуатации первых многоэтажных домов в г. Якутске появились наблюдения о воздействии на них сильных удаленных землетрясений. Выяснилось, что при таких крупных сейсмических событиях наибольшее влияние на высотные здания оказывают не объёмные продольные и поперечные сейсмические волны Р и S, а следующие за ними через 3–7 мин поверхностные длиннопериодные волны. Они вызывают так называемый «эффект этажности», под влиянием которого верхняя часть высотных зданий, получив импульс от сейсмической волны, начинает раскачиваться с амплитудой в десятки см [6–9].

Например, 8-балльное Южно-Якутское землетрясение 1989 г. с $M=6,6$, эпицентр которого располагался на юге республики в 670 км к юго-западу от г. Якутска в пределах Станового хреб-

та, ощущалось в самом городе с макроэффектами на земной поверхности до 2–3 баллов, а на верхних этажах зданий – до 4–5 баллов за счет раскачивания (колебания) последних этажей. Несколько раз сотрясения, ощущаемые на земной поверхности как 2-балльные, были также замечены населением на 9–12 этажах жилых домов при недавних 7–8-балльных чаруодинских землетрясениях, произошедших в 2005–2009 гг. в Южной Якутии с интенсивностью уже в 3–4 балла. К особому случаю относятся проявления глубокофокусного землетрясения 24 мая 2013 г. с $M=8,3$, произошедшего в Охотском море. Его гипоцентр был локализован в мантии Земли на глубине 600 км. Оно произошло на расстоянии 1500 км от г. Якутска и ощущалось в разных частях города от 2 до 5 баллов по шкале MSK-64 [2]. Особенно ярко его воздействия проявились в жилых строениях 202-го и 203-го микрорайонов с преобладанием 9–12-этажных сооружений, строящихся и построенных на намывных грунтах в пойменной части долины р. Лены. При этом в 203-м квартале предполагается обустройство подземных автостоянок, а в подвальных помещениях – расположение различных офисов.

Следует отметить, что такие сооружения будут наиболее уязвимы в случае крупных подземных ударов. Практически на всех верхних этажах зданий в названных кварталах, начиная с пятого и выше, наблюдались 4–5-балльные макроэффекты упомянутого Охотского события: сотрясение зданий, перемещение предметов на столах, полках, звон посуды, падение книг и дискет на пол, передвижение и скрип мебели и др. Это явление вызвало также беспокойство жителей, а в некоторых квартирах панику.

Приведенные сведения указывают на значительный уровень воздействий местной сейсмичности, который зависит не только от грунтовых условий под сооружаемыми объектами, но и от тектонического строения рассматриваемой территории.

Геология и активные разломы Центральной Якутии

Город Якутск расположен в восточной части Сибирской платформы, где выделены крупные тектонические структуры: Якутский выступ архейского фундамента и кайнозойская Нижнеалданская впадина [3, 4]. По результатам геолого-тектонических, геоморфологических и сейсмологических исследований с использованием материалов дистанционных съемок были дешифрованы и изучены активные сейсмотектонические структуры, линеаменты и разломы, контролирующие сейсмичность данного региона,

которые представлены на схеме сейсмотектоники (рис. 3).

Сейсмотектонический анализ территории Лено-Алданского междуречья и левобережья р. Лены в районе г. Якутска показал, что в результате сжатия (врезка, рис. 3, А) со стороны окружающих Нижнеалданскую впадину горных сооружений на её северной окраине возникла Центрально-Верхоянская система субширотных левосторонних сдвигов и взбрососдвигов (Верхоянский, Усть-Алданский) (рис. 3), отделяющих широтную ветвь Верхоянской орогенной области от Предверхоянского краевого прогиба. Подвижки по этим разломам привели к формированию ряда небольших серповидных впадин растяжения (Таттинская, Усть-Алданская и др.), которые в результате последующих горизонтальных смещений оказались рассеченными диагональной системой молодых сдвигов (Амгинский, Табагинский, Кангаласский и др.). Условия сжатия подтверждаются решениями фокальных механизмов землетрясений, возникших в пределах хребтов Черского, Верхоянского, Сетте-Дабана и Станового. В частности, на рис. 3 приведена стереограмма механизма Сетте-Дабанского землетрясения 1951 г., произошедшего вблизи Нелькано-Кыллахского надвига со взбросовым смещением в его очаге [3, 5, 10].

Всё это указывает на структурную перестройку данного региона в современную эпоху, когда под влиянием регионального тангенциального сжатия имеет место коробление краевых частей востока Сибирской платформы. По данным нивелирования I класса на фоне общего воздымания территории со скоростью до 8 мм/год, отдельные участки Нижнеалданской впадины (центральная часть) стабильны (0 мм/год) или в целом испытывают слабое опускание до –4 мм/год, при этом левый берег р. Лены устойчиво поднимается со скоростью до 1 мм/год, а правый – в районе п. Нижний Бестях опускается со скоростью до 38 мм/год [11, 12].

Наиболее крупной дизъюнктивной структурой, тяготеющей к району г. Якутска, является региональный Якутский разлом (древняя деструктивная шовная зона) субмеридионального простирания, отчетливо выраженный на картах магнитного поля в виде мощной положительной аномалии с интенсивностью в 16 миллиэрстед (рис. 4). Существование указанной деструктивной зоны подтверждается также материалами геологической съёмки и бурения [13]. Данная долгоживущая зона разлома имеет сложное строение и разделяется рядом локальных дизъюнктивов на отдельные блоки. В целом названный разлом занимает в районе г. Якутска всю до-

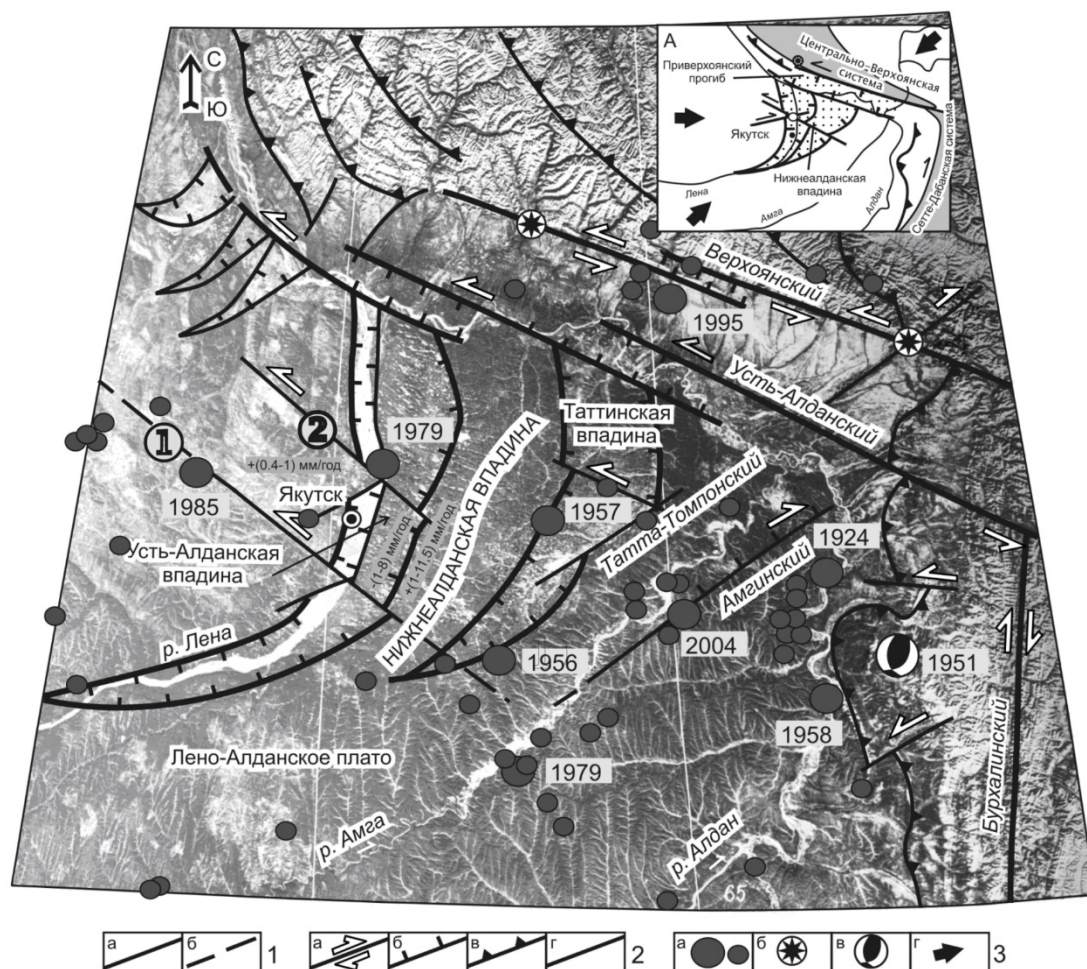


Рис. 3. Схема сейсмотектоники района г. Якутска на основе дешифрирования космоснимка «Метеор» [10]:

1 – активные разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 2 – кинематика разломов: а – сдвиги, б – сбросы, в – взбросы и надвиги, г – неустановленной кинематики; 3, а – эпицентры землетрясений с энергетическим классом $K > 11$ и $K < 10$ (рядом дан год их возникновения), 3, б – сейсмодислокации, 3, в – фокальный механизм Сетте-Дабанского землетрясения 1951 г. (белым цветом показана область волн разрежения, черным – сжатия), 3, г – направление действия регионального сжатия. Цифрами (мм/год) обозначены скорости современных вертикальных движений блоков земной коры [11]. Разломы: 1 – Табагинский, 2 – Кангаласский. Во врезке (рис. 3, А) утолщенными стрелками показана ориентация сжимающих усилий, действующих в очагах местных землетрясений по данным параметров их фокальных механизмов

Fig. 3. Scheme of seismotectonics of Yakutsk region based on interpretation of space image «Meteor» [10]:

1 – active faults: а – established, б – assumed; 2 – kinematics of faults: а – strike-slip faults, б – hade faults, в – upthrows and thrusts, г – unidentified kinematics; 3, а – epicenters of earthquakes with energy class $K > 11$ and $K < 10$ (year of their occurrence is given nearby), 3, б – seismic dislocation, 3, в – focal mechanism of Sette-Daban earthquake of 1951 (white color shows region of rarefaction waves, black - compression ones), 3, г – direction of regional compression. Numbers (mm/year) indicate speeds of modern vertical movements of blocks of earth's crust [11]. Faults: 1 – Tabaga, 2 – Kangalassy. Inset (Fig. 3, A) shows by thickened arrows orientation of compressive forces acting in foci of local earthquakes according to parameters of their focal mechanisms

лину р. Лены и установлен на её обоих берегах. На рис. 4 показана трасса Якутского разлома (темная полоса) и обозначен эпицентр 6-балльного Кангаласского землетрясения 1979 г. 14 января 2008 г. в зоне Якутского разлома вблизи поселков Туктюр и Октёмцы вновь произошло слабое местное землетрясение с энергетическим классом $K=7$. Его гипоцентр располагался на небольшой глубине до 10 км. Важен сам факт

нахождения очага землетрясения в зоне этого дизъюнктива, что свидетельствует о возможности появления здесь более крупных повторных событий. На тектоническую активность Якутского разлома также указывают источники слабоминерализованных и ультрапресных вод («Булус» и др.), которые функционируют в долине и на правом берегу р. Лены, не замерзающие в зимнее время. Там же отмечены и наледные явления [4].

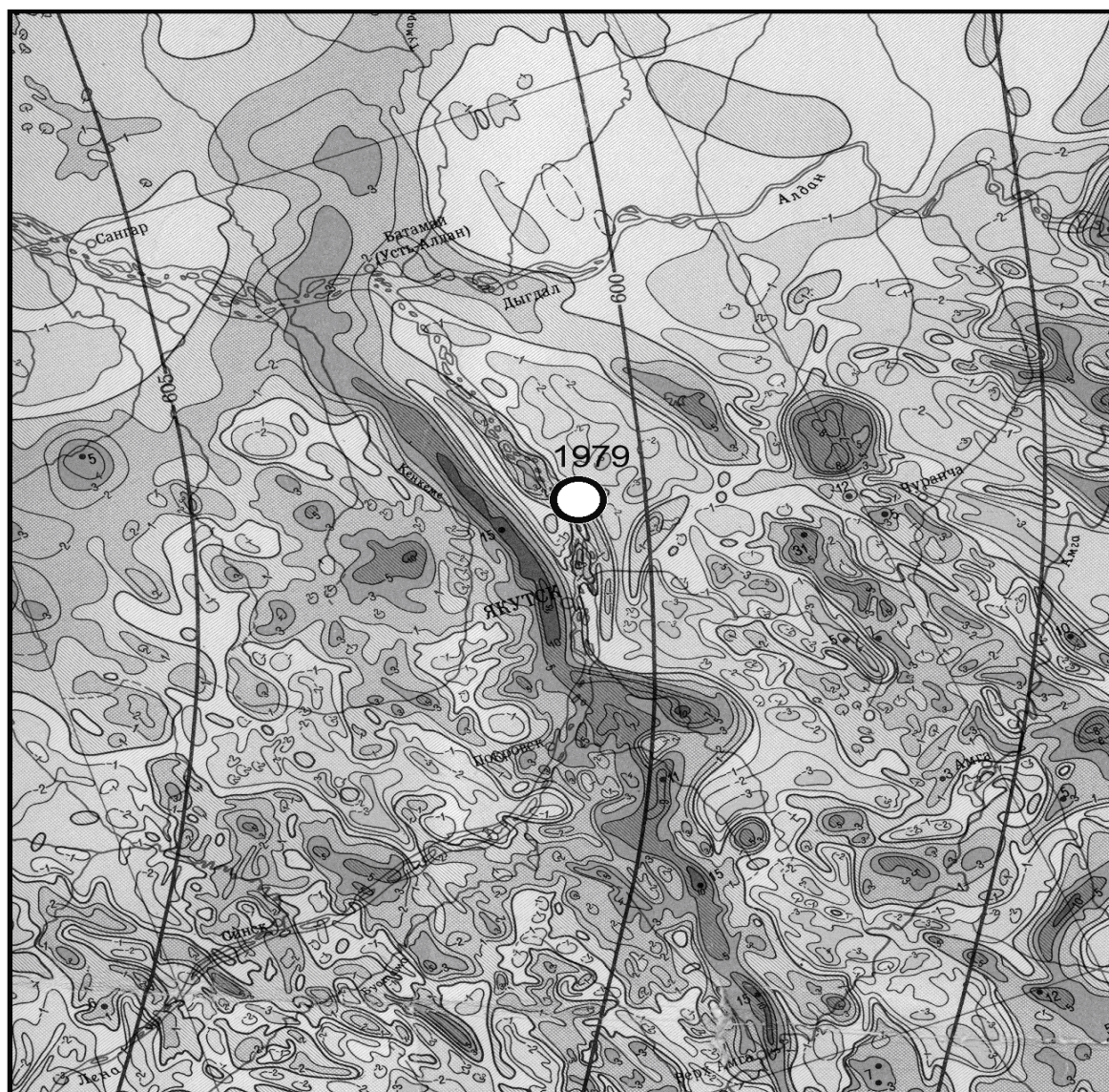


Рис. 4. Фрагмент карты аномального магнитного поля района г. Якутска [14].

Темным цветом показаны отрицательные аномалии, серым – положительные. Субдолготной полосой отрицательных магнитных аномалий от устья р. Алдан на юг к п. Верхняя Амга трассируется линия Якутского разлома. Белый кружок – эпицентр ближайшего к г. Якутску Кангаласского землетрясения 13 июля 1979 г.

Fig. 4. Fragment of map of anomalous magnetic field of Yakutsk region [14].

Negative anomalies are shown in dark color, positive ones in gray. Line of Yakutsk fault is traced by sublongitudinal strip of negative magnetic anomalies from mouth of Aldan river to south to Verkhnyaya Amga village. White circle is epicenter of nearest to Yakutsk Kangalassy earthquake of July 13, 1979

Якутский разлом пересекается серией локальных нарушений северо-западного и северо-восточного простираний, из которых основными и активными в современную эпоху являются Табагинский и Кангаласский сдвиги (рис. 3). Из них более сейсмоактивен Табагинский разлом, расположенный к югу от города, который следует в магнитном поле (в виде ответвления) полосой в направлении северо-запад – юго-восток (рис. 4), пересекая долину р. Лены вблизи Табагинского мыса. К нему в заречных районах на правом берегу и в Горном районе рес-

публики на левом берегу р. Лены приурочены очаги слабых ($K \geq 6-8$) землетрясений. Практика показывает, что после проявления максимальной сейсмической активности на флангах разломов, как это наблюдается в зоне Табагинского разрыва, обычно следует концентрация тектонических напряжений в их центральной части, что приводит впоследствии к возникновению здесь новых очагов землетрясений. Именно на этом участке территории предполагается строительство совмещённого авто- и железнодорожного моста через р. Лену.

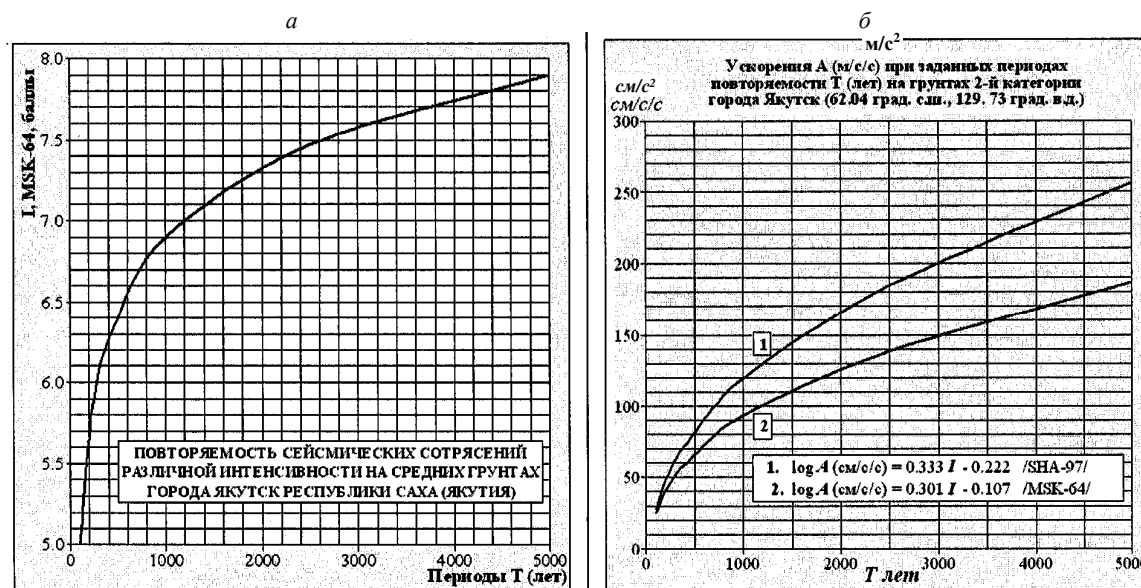


Рис. 5. Повторяемость сейсмического эффекта «I» в долях баллов на средних грунтах (грунт 2-й категории) [15] в г. Якутске за различные периоды времени T лет (а) и вероятностный анализ сейсмической опасности в ускорениях, выполненный для средних грунтов г. Якутска по формулам 1 и 2 и соответствующим им кривым (б)

Fig. 5. Repeatability of seismic effect «I» in fractions of points on medium soils (soil of 2nd category) [15] in Yakutsk for different periods of time T in years (left). Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) in accelerations A (cm/s²), performed for average soils of Yakutsk according to formulas 1 and 2 and corresponding curves shown in right figure

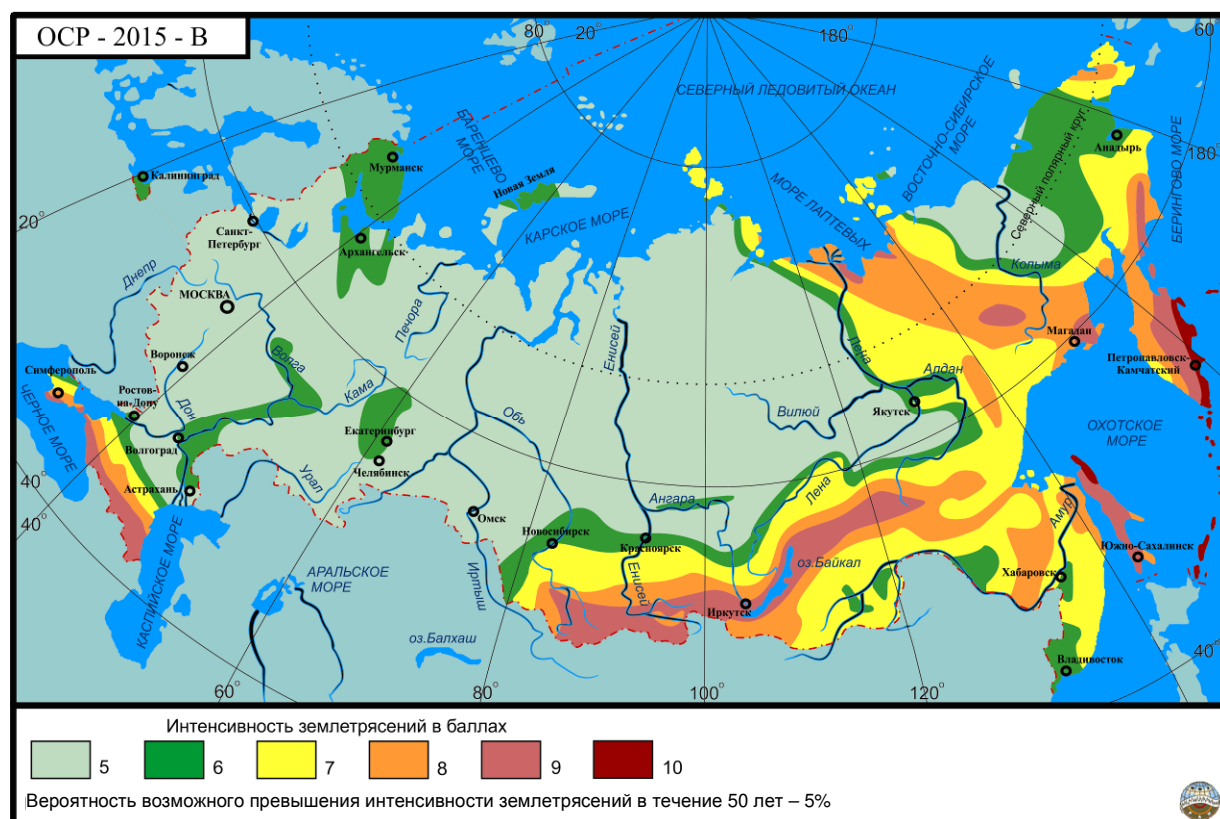
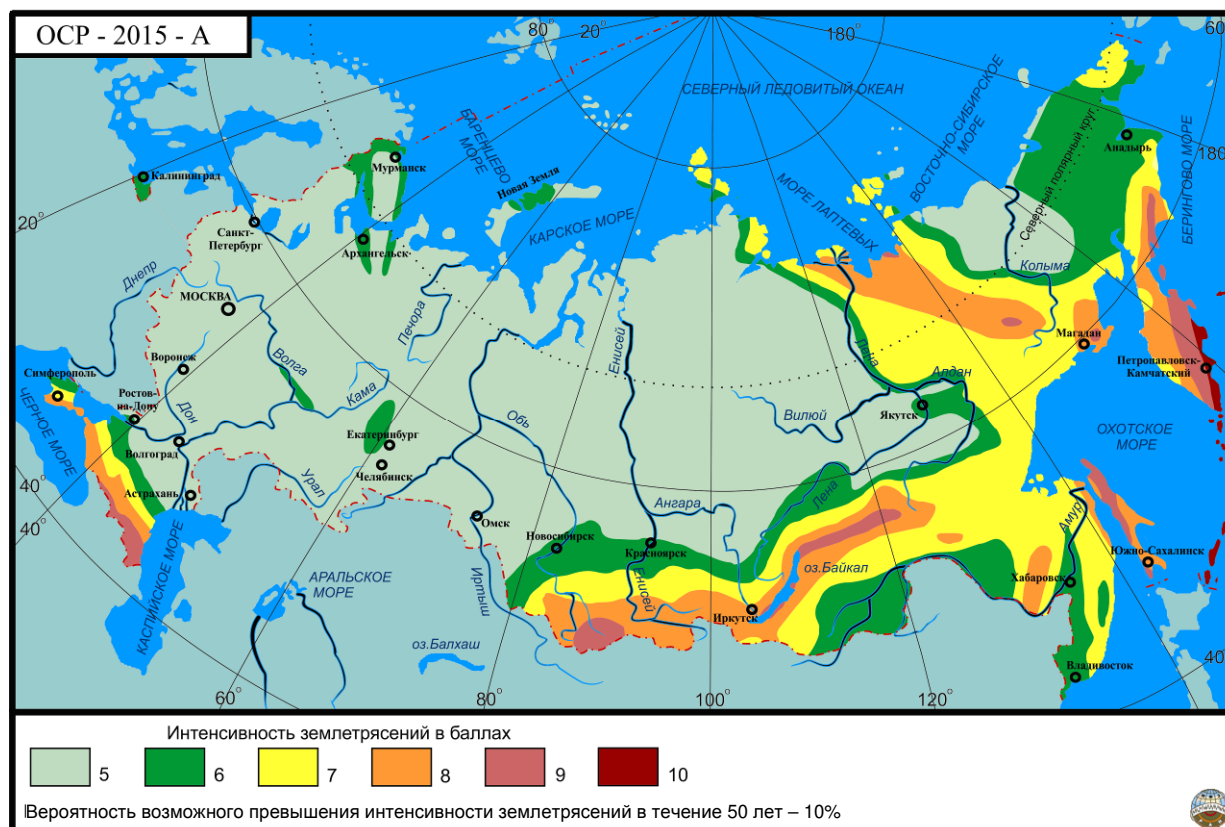
Комплекс представленных здесь геолого-геофизических данных был использован и вошел составной частью в «Карту общего сейсмического районирования Российской Федерации (ОСР-97), а затем и (ОСР-2015)», в соответствии с которыми г. Якутск находится в зонах сейсмической опасности в 6–8 баллов в зависимости от выбранной карты А, В или С, отражающей степень ответственности сооружений и время вероятной повторяемости землетрясений [15, 16]. По совокупности имеющихся сейсмологических и тектонических сведений на основе данных карт ОСР-2015 для г. Якутска был проведен вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) в параметрах сейсмической интенсивности «I» – в баллах шкалы MSK-64 для периодов повторяемости сейсмического эффекта в среднем один раз в 100, 250, 500, 1000, 2500 и 5000 лет. При этом ВАСО в терминах пиковых ускорений вычислен как по зависимости между баллами и ускорениями, соответствующей шкале MSK-64, так и по формуле SHA-97, примененной В. И. Уломовым при составлении фрагмента карты Северной Евразии для мировой карты «Глобальной сейсмической опасности», созданной по программе GSHAP [16, 17]. Эти две зависимости (1 и 2), уравнения которых приведены на рис. 5, б, являются пределами изменений величины пиковых ускорений при соответствующих периодах их повторяемости на средних грунтах г. Якутска, для которого составлены эти графики.

Используя полученные кривые зависимости интенсивности землетрясений «I» и пиковых ускорений от повторяемости во времени сейсмических событий «T» (рис. 5), были рассчитаны и приведены в таблице их величины для 6 интервалов времени от 100 до 5000 лет. Табличные значения ожидаемых сейсмических воздействий, выраженные в баллах и ускорениях, подтверждают базовую сейсмичность района г. Якутска, принятую на нормативных картах ОСР-2015 [16], равную для объектов разного уровня ответственности (рис. 6): 6 баллов – А, 7 баллов – В и 8 баллов – С.

Повторяемость сейсмических воздействий и величина пиковых ускорений для средних грунтов г. Якутска

Repeatability of seismic impacts and peak acceleration value for medium soils of Yakutsk

Карты ОСР-2015 General Seismic Zoning (GSZ) Maps-2015	T, лет T, years	I, баллы I, points	A, см/с ² (MSK-64)	A, см/с ² (SHA-97)
–	100	5.0	25.0	27.7
–	250	5.9	46.7	55.3
ОСР-15А GSZ-2015А	500	6.4	66.0	81.1
ОСР-15В GSZ-2015В	1000	6.9	93.3	119.0
–	2500	7.5	138.5	184.3
ОСР-15С GSZ-2015С	5000	7.9	186.6	256.3



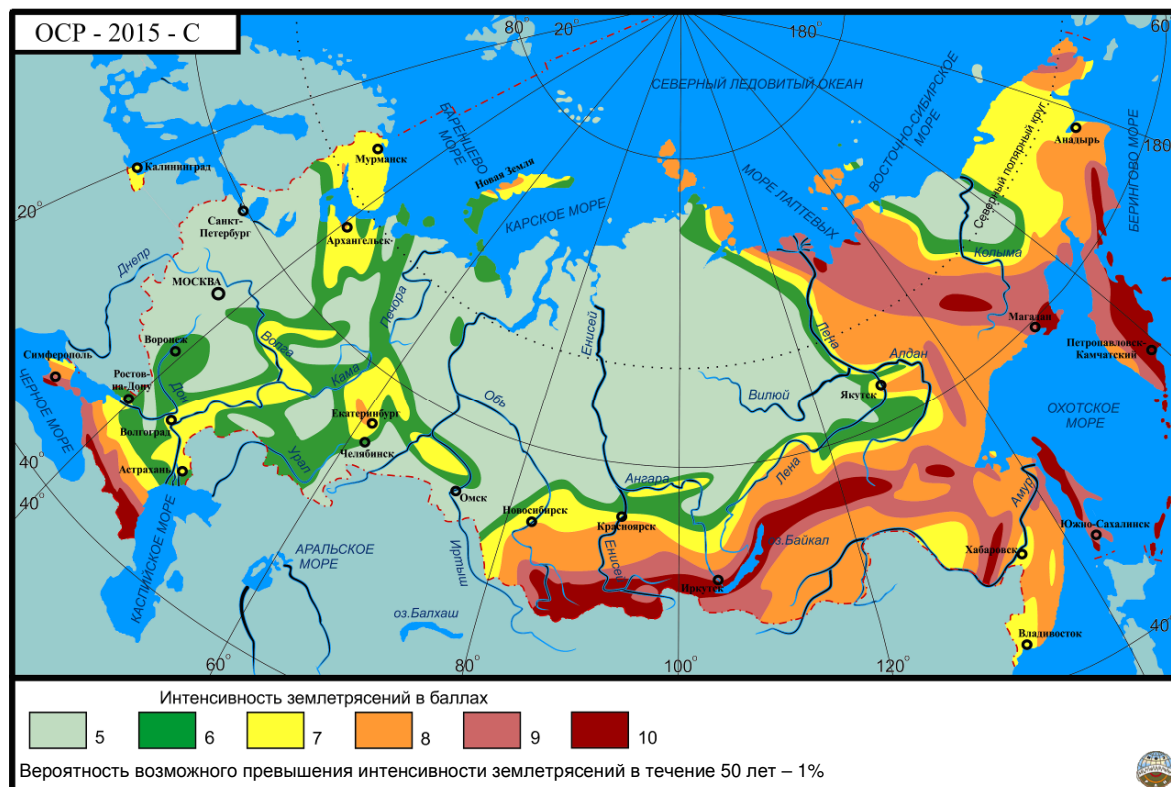


Рис. 6. Карты сейсмического районирования ОСР-2015 (А–С) [16]

Fig. 6. Maps of seismic zoning GSZ-2015-A [16]

Вместе с тем изложенные выше среднестатистические расчеты по повторяемости сейсмических воздействий могут не совпадать с частотой реальных природных процессов. Известны, например, случаи нарушения этой последовательности, когда катастрофические землетрясения на одной и той же территории происходили не через 5000 лет, а через 8–10 лет и даже в течение одного года: Якутия (бассейн р. Олёкмы), Камчатка, Япония, юго-восточная Азия (о. Суматра), Гаити и последние сейсмические события в Италии [<http://www.isc.ac.uk>].

Сейсмический риск

Под сейсмическим риском понимается: «Вероятность непревышения или превышения установленного уровня сейсмического воздействия либо вероятность социального и экономического ущерба, связанного с землетрясениями на заданной территории в течение определённого интервала времени» [18].

Существует ряд других определений сейсмического риска. В работах ЦНИИСК, ИФЗ РАН и ИЗК СО РАН понятие «сейсмический риск», например, связывается с вероятностью разрушения сооружений [19, 20] или представляет вероятность социальных, экономических и экологических потерь от возможных землетрясений за определённый промежуток времени в соот-

ветствии с сейсмической опасностью территории и уязвимостью находящихся на ней объектов [21]. В конечном итоге сейсмический риск может оцениваться суммой следующих компонент: природной сейсмической активностью, техногенной надёжностью среды обитания, возможностью предупреждения о землетрясении, отношением населения и административных органов к проблеме сейсмической опасности.

Большое число городов в сейсмоактивных регионах РФ исторически изначально строилось без учёта сейсмической опасности, поэтому их население постоянно подвержено сейсмическому риску. К этой категории относится и г. Якутск. В настоящее время сейсмическая опасность территории Республики Саха (Якутия) определяется по нормативным картам Общего сейсмического районирования (ОСР-2015) [16], которые по существу содержат данные о долгосрочном прогнозе возникновения на определённой территории землетрясений различной интенсивности (рис. 6). Поэтому наиболее целесообразным и эффективным методом смягчения сейсмического риска, особенно на вновь осваиваемых территориях, являются разработка сценариев воздействия землетрясений в сеймоопасных зонах, оценка возможной уязвимости существующих и возводимых объектов, мероприятия по сейсмоусилению зданий и сооруже-

ний и, тем самым, уменьшение риска экономических, социальных и экологических катастроф от воздействия землетрясений [4, 13, 17].

Город Якутск и его жители в настоящее время находятся в зоне сейсмического риска, обусловленного возможностью проявления на его территории землетрясений интенсивностью до 6–8 баллов, которые могут ощущаться на некоторых участках городской застройки с неблагоприятными инженерно-геологическими свойствами грунтов основания и отсутствием достаточной сейсмостойкости у подавляющего большинства существующих сооружений.

Уменьшение сейсмического риска на территории Республики Саха (Якутия) в ближайшие годы связывается с выполнением мероприятий по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений, которые предусмотрены РЦП «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Республики Саха (Якутия) на 2009–2013 годы», принятой 23 апреля 2009 г. Программа предполагает разработку правил сейсмической паспортизации существующих несейсмостойких объектов, уточнение исходного сейсмического балла территории города в целом и его отдельных участков, изучение динамики изменения и современного состояния физических свойств грунтов, в том числе и его растепления, проведение работ по сейсмическому микрорайонированию, составление проектов усиления зданий и сооружений с учётом сейсмического риска их разрушения под воздействием сильных землетрясений.

Приведённая информация свидетельствует об актуальности и необходимости оценки сейсмического риска территории г. Якутска, поскольку в городе подавляющее большинство зданий построено без сейсмоусиления. Здесь по официальным данным около 500 домов признаны аварийными, а в течение последних 20 лет почти ежегодно происходит разрушение 1–2 домов даже без воздействия землетрясений.

Опыт оценки сейсмического риска в других регионах Российской Федерации показывает, что для получения достоверных данных по сейсмическому риску необходимо выполнить ряд последовательных операций [19, 20]. В первую очередь производится оценка сейсмической опасности территории города, для чего составляются карты детального и сейсмического микрорайонирования [7]. Раньше в г. Якутске работы по составлению таких карт не проводились, но по имеющимся характеристикам инженерно-геологических условий, уровню сейсмической активности и результатам сейсмотектонических исследований можно уверенно утверждать о

наличии на территории города зон с сейсмической опасностью в 7 и 8 баллов [3, 10, 13].

Следующей составляющей сейсмического риска является оценка уязвимости территории застройки. Под уязвимостью следует понимать отношение состояния и свойств строительного объекта, связанных с процессом эксплуатации, техногенными и природными воздействиями, к состоянию грунтов и их свойствам [22]. С экономической точки зрения, уязвимость определяется как отношение стоимости восстановления здания или сооружения к их первоначальной стоимости: $V_e(H) = P/P$, где $V_e(H)$ – степень уязвимости (вероятность разрушения) объектов при событии H ; P_e – стоимость восстановления разрушенных объектов; P – первоначальная стоимость объектов.

При оценке уязвимости предлагается выполнение нескольких последовательных действий: классификация объектов риска по их внутренним свойствам (по степени их реакции на заданное сейсмическое воздействие); паспортизация объектов на заданной территории, т.е. отнесение каждого объекта к определённому классу, оценка его стоимости и уязвимости; определение функции уязвимости для каждого класса объектов или оценка соотношения между сейсмическим воздействием и степенью ущерба.

Паспортизацию зданий и сооружений рекомендуется проводить в следующей последовательности: изучение физических свойств грунтов основания (мёрзлые, талые, пучинистые, засоленные, обводнённые и др.) [23]; выполнение исследований по сейсмическому микрорайонированию [9]; выделение на территории города зон по уровню сейсмической опасности; классификация объектов в каждой зоне; определение количества объектов каждого класса в каждой зоне; определение функции уязвимости объектов каждого класса; состояние конструкций зданий и сооружений. При этом функция уязвимости, связывающая степень ущерба с силой сейсмического воздействия от землетрясения, определяется в основном эмпирическим путём, а именно степенью разрушения конструкций под воздействием землетрясений. Для этого рассчитываются коэффициент повреждаемости K_d (средняя степень повреждения однотипных зданий), экономические затраты на восстановление разрушенных (повреждённых) зданий:

$$K_d = \sum_i d_i n_i / N,$$

где d_i – степень повреждений зданий; n_i – число однотипных зданий с повреждением d_i ; N – общее число зданий одного типа.

При оценке риска важнейшими показателями также являются плотность населения и застройки, этажность, год постройки и т.д. Для этого территория города делится на участки, в пределах каж-

дого из которых учитываются строительные объекты с различной этажностью, конструктивными особенностями и числом жителей (жилые дома, школы, административные здания, объекты культуры, котельные и т.д.). В итоге можно выполнить качественную оценку риска, определить уровень возможной повреждаемости данного типа сооружений и оценить возможные потери от землетрясений различной интенсивности [19, 22]. После проведения процедур вычисления средней этажности существующих зданий и экспрессной оценки численности населения рассчитывается полный экономический ущерб как сумма отдельных видов ущерба для всех зон различной балльности на территории города. Экономические потери от воздействия землетрясений различной интенсивности оцениваются с учётом результатов сейсмического микрорайонирования.

Закключение

Специальные исследования сейсмического риска, связанного с застройкой территории и плотностью населения г. Якутска, до сих пор целенаправленно не проводились. Имеется лишь разрозненный фактический материал по инженерно-геологическим изысканиям под строившиеся объекты, но динамика изменения физических свойств грунтов в процессе эксплуатации не обобщалась и не анализировалась. Результаты сейсмического микрорайонирования, проведённые на некоторых городских площадках, показали наличие 6, 7 и 8-балльных зон сейсмического воздействия, а следовательно и разного уровня сейсмического риска на них.

Одними из отрицательных факторов, повышающих уровень сейсмического риска в г. Якутске, являются также отсутствие ливневой канализации и ежегодно увеличивающиеся площади подтопления (заболачивания), постоянные утечки из инженерных сетей, нарушение правил инженерной подготовки (в частности подсыпка грунта) территории перед началом строительства объектов. Развитие криопэгов в грунтах основания зданий приводит к разрушению свайных фундаментов, сваи «не несут» нагрузку зданий.

Таким образом, возможные сейсмические воздействия, активные тектонические движения, неблагоприятные грунтовые условия, высокая плотность населения, продолжающаяся активная урбанизация городской среды на фоне глобального потепления климата позволяют отнести всю территорию агломерации Якутска к зоне повышенного сейсмического риска. Комплексная оценка степени риска даст возможность учитывать эти данные при проектировании и строительстве сейсмостойких сооружений и обеспечить безопасность населения.

Поэтому для оценки сейсмического риска научными и производственными организациями при поддержке городской администрации требуются пролонгирование на новый срок РЦП «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Республики Саха (Якутия)», принятой на 5 лет ещё в 2009 г., и следующие совместные мероприятия:

- создание карты сейсмической опасности г. Якутска крупного масштаба (1: 200 000);
- проведение исследований нарушенности и уязвимости зданий в городе с их паспортизацией;
- детальные инженерно-геологические и геокриологические изыскания в районе Большого Якутска;
- выполнение работ по сейсмическому микрорайонированию городских площадок;
- составление карты сейсмического риска г. Якутска.

Решение этих задач позволит сделать жизнь жителей и гостей столицы Якутии более безопасной и комфортной и снять вопросы социальной напряженности горожан, часто просто не подготовленных к возможным сейсмическим и экологическим катастрофам.

Литература

1. *Мушкетов И., Орлов А.* Каталог землетрясений Российской империи. СПб.: Типография Императорской академии наук, 1893. 852 с.
2. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
3. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмостектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 226 с.
4. *Шибяев С.В., Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Имаева Л.П., Тимишин К.В.* Сейсмический риск на территории г. Якутска // Наука и образование. 2010. № 2. С. 4–10.
5. *Сейсмостектоника Северо-Восточного сектора Российской Арктики* / Отв. ред. Л.П. Имаева, И.И. Колодезников. Новосибирск: Наука, 2017. 134 с.
6. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО «Геореконструкция–Фундаментпроект», 1996. 383 с.
7. *Алешин А.С.* Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
8. *Шерман С.И., Берзинский Ю.А., Павленов В.А., Антикаев Ф.Ф.* Региональные шкалы сейсмической интенсивности. Новосибирск: Гео, 2003. 189 с.
9. *Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства.* М.: Госстрой СССР, 1985. 72 с.

10. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Активные сейсмоструктуры Лено-Алданского междуречья (Центральная Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 2. С. 1–6.

11. *Бочаров Г. В., Гусев Г. С., Петров А. Ф., Спектор В. Б.* Карта современных вертикальных движений земной коры Якутии м-ба 1:2 500 000. Якутск: ЯкутАГП, 1997.

12. *Бочаров Г.В., Гусев Г.С., Есикова Л.В., Спектор В.Б.* Карта современных движений территории Якутской АССР // Геотектоника. 1982. № 3. С. 60–63.

13. *Петров А. Ф., Шибаетов С.В., Козьмин Б. М., Тимиршин К.В.* Сейсмичность и сейсмостойкое строительство в Якутии // Наука и техника в Якутии. Новосибирск: Гео, 2007. С. 65–70.

14. *Карта* аномального магнитного поля России и прилегающих акваторий м-ба 1:2 500 000. 2016.

15. *СНП II-7-81**. Строительство в сейсмических районах. М.: ГУП ЦПП Госстроя России, 2000.

16. *Сейсмическое* районирование территории Российской Федерации ОСР-2015. Карта на 4-х листах / Гл. редактор Е.А. Рогожин. М.: ОИФЗ РАН, 2015.

17. *Уломов В.И.* Об основных положениях и технических рекомендациях по созданию новой карты сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2, № 3. С. 9–26.

18. *Словарь-справочник* терминов нормативно-технической документации: «Academic.ru». 2015.

19. *Леви К.Г., Радзиминович Я.Б.* Сейсмический риск промышленных центров Иркутской области // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. Новосибирск: Наука, 1996. С. 203–205.

20. *Манилов Ю.Ф., Барашиков И.А., Жесткова С.Г.* Сейсмические риски: проблемы и оценки // Технологии гражданской безопасности. 2014. Т. 11, № 2 (40). С. 44–47.

21. *Au S.K., Beck J.L.* Subset simulation and its application to seismic risk based on dynamic analysis // Journal of engineering mechanics. ASCE. 2003. P. 901–917. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9399(2003)129:8(901).

22. *Заалишвили В.Б., Можиев Х.Н.* Сейсмический риск существующей застройки на территории г. Владикавказа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008. № 4. С. 40–43.

23. *Воронков О.К.* Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов).

СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с.

References

1. *Mushketov I., Orlov A.* Katalog zemletryasenij Rossijskoj imperii. SPb.: Tipografiya Imperatorskoj Akademii nauk, 1893. 852 s.

2. *Medvedev S.V., Sponheuer V., Karnik V.* Shkala sejsmicheskoy intensivnosti MSK-64. M.: MGK AN SSSR, 1965. 11 s.

3. *Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M.* Sejsmo-tektonika Yakutii. M.: GEOS, 2000. 226 s.

4. *Shibaev S.V., Petrov A.F., Koz'min B.M., Imaeva L.P., Timirshin K.V.* Sejsmicheskij risk na territorii g. Yakutskaja // Nauka i obrazovanie. 2010. № 2. S. 4–10.

5. *Sejsmotektonika* Severo-Vostochnogo sektora Rossijskoj Arktiki / Otv. red.: L.P. Imaeva, I.I. Kolodeznikov. Novosibirsk: Nauka, 2017. 134 s.

6. *Ishikhara K.* Povedenie gruntov pri zemletryaseniyakh. SPb.: NPO «Georekonstruktsiya–Fundamentproekt», 1996. 383 s.

7. *Aleshin A.S.* Sejsmicheskoe mikrorajonirovanie osobo otvetstvennykh ob'ektov. M.: Svetoch Plyus, 2010. 304 s.

8. *Sherman S.I., Berzhinskij Yu.A., Pavlenov V.A., Aptikaev F.F.* Regional'nye shkaly sejsmicheskoy intensivnosti. Novosibirsk: Geo, 2003. 189 s.

9. *Rekomendatsii* po sejsmicheskomu mikrorajonirovaniyu pri inzhenernykh izyskaniyakh dlya stroitel'stva. M.: Gosstroj SSSR, 1985. 72 s.

10. *Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M.* Aktivnye sejsmostrukturnye Leno–Aldanskogo mezhdurech'ya (Tsentral'naya Yakutiya) // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2006. № 2. S. 1–6.

11. *Bocharov G.V., Gusev G.S., Petrov A.F., Spector V.B.* Karta sovremennykh vertikal'nykh dvizhenij zemnoj kory Yakutii m–ba 1 : 2 500 000. Yakutsk: YakutAGP, 1997.

12. *Bocharov G.V., Gusev G.S., Esikova L.V., Spector V.B.* Karta sovremennykh dvizhenij territorii Yakutskoj ASSR // Geotektonika. 1982. № 3. S. 60–63.

13. *Petrov A.F., Shibaev S.V., Kozmin B.M., Timirshin K.V.* Sejsmichnost' i sejsmostojkoe stroitel'stvo v Yakutii // Nauka i tekhnika v Yakutii. Sbornik statej. Novosibirsk: Geo, 2007. S. 65–70.

14. *Karta* anomal'nogo magnitnogo polya Rossii i privileyuschikh akvatorij m–ba 1:2 500 000, 2016.

15. *SNiP II-7-81**. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonakh. M.: GUP TsPP Gosstroya Rossii, 2000.

16. *Sejsmicheskoe* rajonirovanie territorii Rossijskoj Federatsii OSR–2015. Karta na 4-kh listakh / Gl. redaktor: E.A. Rogozhin. M.: OIFZ RAN, 2015.

17. *Ulomov V.I.* Ob osnovnykh polozheniyakh i tekhnicheskikh rekomendatsiyakh po sozdaniyu novoy karty sejsmicheskogo rajonirovaniya territorii

Rossijskoj Federatsii // Sejsmichnost' i sejsmicheskoe rajonirovanie Severnoj Evrazii. M.: OIFZ RAN, 1995. Vyp. 2, № 3. S. 9–26.

18. *Slovar'-spravochnik terminov normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii*: «Academic.ru». 2015.

19. *Levi K.G., Radziminovich Ya.B.* Sejsmicheskij risk promyshlennykh tsentrov Irkutskoj oblasti // *Geofizicheskie issledovaniya v Vostochnoj Sibiri na rubezhe XXI veka*: Sb. nauch. tr. Novosibirsk: Nauka, 1996. S. 203–205.

20. *Manilov Yu.F., Barashikov I.A., Zhestkova S.G.* Sejsmicheskie riski: problemy i otsenki // *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*. 2014. T. 11, № 2 (40). S. 44–47.

21. *Au S.K., Beck J.L.* Subset simulation and its application to seismic risk based on dynamic analysis // *Journal of engineering mechanics*. ASCE. 2003. P. 901–917. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2003) 129:8(901).

22. *Zaalishvili V.B., Mozhiyev H.N.* Sejsmicheskij risk suschestvuyushej zastrojki na territorii g. Vladikavkaza // *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2008. № 4. S. 40–43.

23. *Voronkov O.K.* Inzhenernaya sejsmika v kriolitozone (izuchenie stroeniya i svojstv merzlykh i talykh gornyx porod i massivov). SPb.: Izd-vo OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2009. 401 s.

Поступила в редакцию 07.09.2018

Об авторах

ИМАЕВ Валерий Сулейманович, доктор геолого-минералогических наук, академик Академии наук Республики Саха (Якутия), главный научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-6510-0526>, imaev@crust.irk.ru;

ИМАЕВА Людмила Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-8235-7112>, imaeva@crust.irk.ru;

КОЗЬМИН Борис Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-4270-1318>, b.m.kozmin@diamond.ysn.ru;

ПЕТРОВ Анатолий Фирсович, кандидат геолого-минералогических наук, главный специалист, Якутский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН, 677007, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-6236-5062>, afpetrov80@yandex.ru;

ШИБАЕВ Сергей Валентинович, директор, Якутский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН, 677007, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-7819-072X>, shibaev@emsd.ru;

ГРИБ Николай Николаевич, доктор технических наук, зам. директора, Технический институт (филиал) СВФУ им. М.К. Аммосова, 678960, Нерюнгри, ул. Кравченко, 16, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-3818-9473>, grib@nfygu.ru;

КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич, доктор геолого-минералогических наук, президент, Академия наук Республики Саха (Якутия), 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, Россия, anrsya@mail.ru.

About the authors

ИМАЕВ Valeriy Suleimanovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Academician of Academy of Sciences of Republic of Sakha (Yakutia), Principal Researcher, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontova St., Irkutsk, 664033, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-6510-0526>, imaev@crust.irk.ru;

ИМАЕВА Ludmila Petrovna, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontova St., Irkutsk, 664033, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-8235-7112>, imaeva@crust.irk.ru;

KOZMIN Boris Mikhailovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-4270-1318>, b.m.kozmin@diamond.ysn.ru;

PETROV Anatoliy Firsovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Specialist, Yakutsk Branch of the Federal Research Center of the Unified Geophysical Service of the RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677007, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-6236-5062>, afpetrov80@yandex.ru;

SHIBAEV Sergey Valentinovich, Director, Yakutsk Branch of the Federal Research Center of the Unified Geophysical Service of the RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677007, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-7819-072X>, shibaev@emsd.ru;

GRIB Nikolai Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director, Technical Institute (Branch) of M.K. Ammosov NEFU, 16 Kravchenko St., Neryungri, 678960, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-3818-9473>, grib@nfygu.ru;

KOLODEZNIKOV Igor Innokent'evich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, President, Academy of Sciences of Republic of Sakha, 33 Lenin Ave., Yakutsk, 677007, Russia, anrsya@mail.ru.