

УДК 550.34:550.831.01

СВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ С ИЗБЫТОЧНЫМИ МАССАМИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Великанов А.Е., Аристова И.Л.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приводятся факты и примеры связи сейсмичности с *локализованными избыточными массами* земной коры, расположенными как на дневной поверхности в виде возвышений горных пород различной плотности, так и, в меньшей степени, под дневной поверхностью в виде ограниченных объёмов пород с повышенной плотностью. Эти связи рассмотрены как в глобальном масштабе, так и на региональном уровне на территории Центральной Азии с использованием геодезических и гравиметрических данных в виде детальных карт цифровых моделей рельефа и аномалий силы тяжести в свободном воздухе, полученных по результатам высокоточных спутниковых съёмок.

ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее количество эпицентров землетрясений приурочено к горной местности. Чем выше относительная высота и крутизна гор, тем сильнее проявляется сейсмичность территории, выраженная в количестве и силе землетрясений. И чем массивнее горные образования, тем значительнее глубина очагов землетрясений. Сопоставление геодезических карт рельефа местности и гравиметрических карт локальных аномалий силы тяжести показывает, что гравитационные аномалии часто вызваны как выступающими на поверхность горными массами в виде возвышений, так и повышенной плотностью масс внутри земной коры.

В последнее десятилетие при анализе сейсмичности и гравиметрических карт на территории Казахстана и прилегающих площадях в пределах Центральной Азии была замечена приуроченность многих эпицентров умеренных и сильных землетрясений тектонического характера к локальным аномалиям и аномальным зонам силы тяжести. Особенно это стало заметно при анализе гравиметрических карт в редукции Фая и близким к ним по содержанию карт аномалий силы тяжести в свободном воздухе, при создании которых не вычитается промежуточный слой геологической среды и учитываются все формы положительного рельефа возвышенной и горной местности. Гравиметрические карты в редукции Буге (Bouguer gravity anomaly) дают возможность выявить аномалии силы тяжести, связанные с геологической средой повышенной плотности независимо от форм рельефа, как в равнинной, так и в горной местности. Гравиметрические карты аномалий силы тяжести в свободном воздухе (free-air gravity anomaly) и в редукции Фая (Faye gravity anomaly) дают возможность выявить локализованные аномалии с избыточной массой, связанные как с объёмами пород повышенной плотности, так и с участками пород с возвышенными формами рельефа, которые даже при нормальной или пониженной плотности пород всё равно представляют *возмущающую избыточную массу* в данном месте [1]. Гравитационные возмущения локализованных избыточных масс геологической среды

вызываются преимущественно периодическим действием *лунно-солнечных приливных сил*, которые способствуют переходу пород на большей глубине в напряжённо-деформированное состояние и генерации сейсмотектонических напряжений в них.

ГЛОБАЛЬНАЯ СВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ С ИЗБЫТОЧНЫМИ ГОРНЫМИ МАССАМИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

Начало XXI века ознаменовалось широким использованием новых спутниковых технологий в исследованиях из космоса всей поверхности Земли. Первым знаменательным событием явился полёт в феврале 2000 года космического челнока шаттла Индевор (США) с миссией SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), который в течение 11 дней без перерыва независимо от метеорологических условий, времени суток с высоты 233 км провёл высокоточную радарную топографическую съёмку поверхности Земли от 56° южной широты до 60° северной широты. Эта съёмка позволила получить высокоточную цифровую модель рельефа (ЦМР) с разрешением 30 м (рисунок 1) [2].

Вторым знаменательным событием стало осуществление семилетней (2002–2009) спутниковой гравиметрической миссии GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), проведенной совместно NASA и Немецким аэрокосмическим центром. В рамках миссии GRACE проведены высокоточные детальные измерения аномалий поля силы тяжести Земли и их изменений за пятилетний период. С использованием этих данных и последующих спутниковых миссий CHAMP (Challenging Mini Satellite Payload, 2000–2010 гг.), GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, 2009–2014 гг.), а также результатов наземных и морских гравиметрических съёмок построена наиболее точная карта глобального гравитационного поля Земли WGM2012 (рисунок 2) [3]. Два вида информации пространственных данных: по геодезическим измерениям (различных форм земной поверхности) и по гравиметрическим определениям (масс пород под каждой формой поверхности), – тесно взаимосвязаны между собой и дополняют друг друга при изучении различных геодинамических

процессов у поверхности и в недрах земли, включая сейсмичность.

Сравнение карты глобального гравитационного поля Земли (рисунок 2) и глобальной карты распределения сейсмичности с эпицентрами ощутимых землетрясений по всему миру (рисунок 3) показывает заметное совпадение зон сейсмичности с зонами аномалий силы тяжести. Причём эти совпадения, как совпадения с избыточными горными массами геологической среды, наблюдаются в местах с наиболее возвышенными формами рельефа земной поверхности и океанического дна, включая зоны островных дуг и срединно-океанических хребтов.

Однако имеются единичные места, где совпадение зоны аномалий силы тяжести в свободном воздухе с зоной сейсмичности не связано с возвышенными формами рельефа. Например, такая зона сейсмичности наблюдается в южной части Аравийского полуострова, где она проходит с востока на запад из Ара-

вийского моря через Аденский залив, а потом на северо-запад через Красное море. Здесь в центральной части морских проливов на дне находится узкая зона базальтовых пород повышенной плотности, которая отмечается вытянутой зоной слабых гравитационных аномалий силы тяжести в свободном воздухе и интенсивной вытянутой аномалией силы тяжести в редукции Буге. В Охотском море наблюдается несовпадение зоны сейсмичности глубокофокусных землетрясений с возвышенными формами рельефа на поверхности дна, хотя зона относительно слабых гравитационных аномалий силы тяжести имеется. Напряжённо-деформированное состояние недр под Охотским морем, по-видимому, вызывается многократным появлением огромной избыточной водной массы при периодическом (дважды в сутки) образовании высокого приливного горба (ориентировочно до 15–25 м) в центральной, ближе к глубоководной, части Охотского моря.

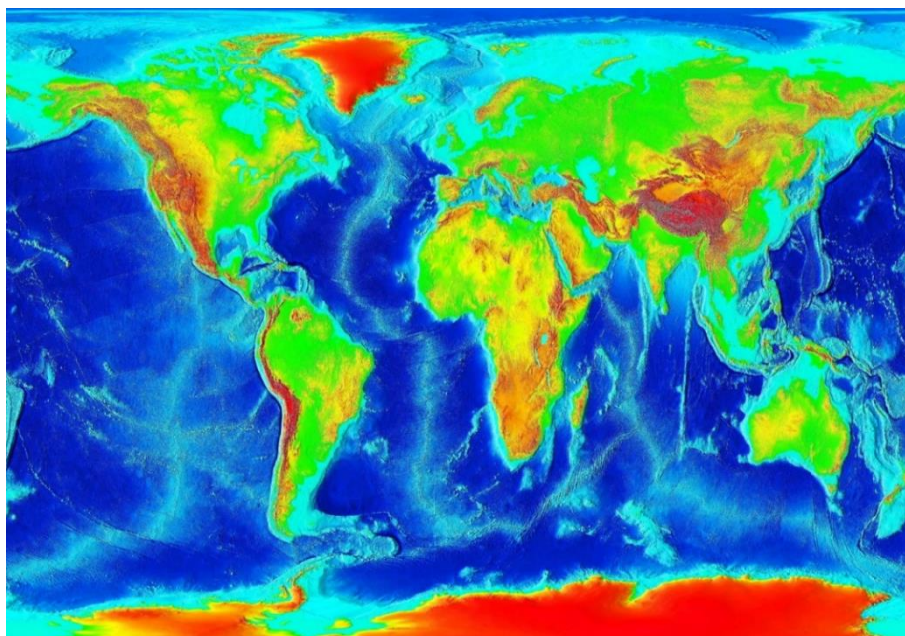


Рисунок 1. Глобальная цифровая модель рельефа Земли [<http://mapsof.net/the-world/elevation>]

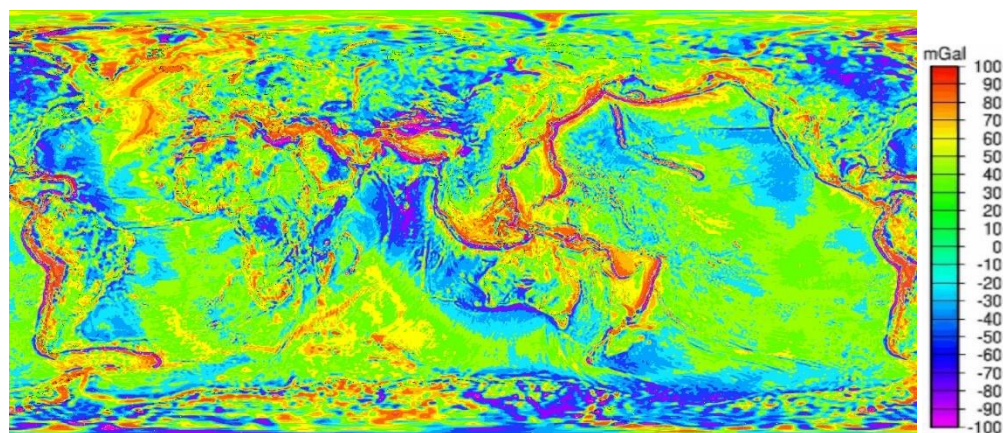


Рисунок 2. Глобальная карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе WGM2012 [www.csr.utexas.edu]

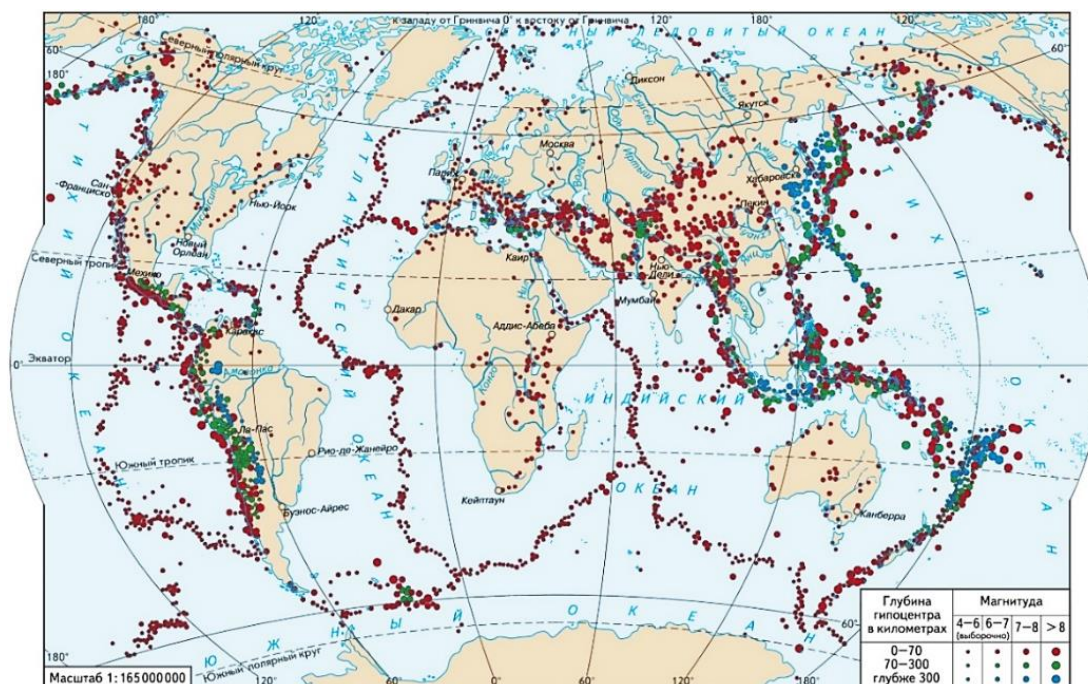


Рисунок 3. Карта землетрясений мира за 1900–2007 гг. [https://i.ytimg.com/vi/ps3Y0UdEo08/maxresdefault.jpg]

В приполярных широтах есть территории Гренландии и Антарктиды с сильно возвышенным рельефом до 5000 и более метров над уровнем моря (рисунок 1). Но здесь не отмечена глобальная связь возвышенных форм рельефа с сейсмичностью по причине низкой плотности ледниковых панцирей, покрывающих эти территории.

СВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ С ИЗБЫТОЧНЫМИ МАССАМИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Доступность детальных карт цифровых моделей рельефа и гравиметрических карт на обширных территориях, составленные в международных центрах данных по высокоточным глобальным спутниковым съёмкам [4], а также наличие данных по произошедшим землетрясениям позволяют объективно оценить связь сейсмичности с возмущающими избыточными массами геологической среды на территории Центральной Азии.

Для анализа были использованы две основные таблицы сейсмичности по территории Центральной Азии в пределах координат 30–60° СШ и 40–100° ВД. Первая из таблиц включала сведения только по землетрясениям с древнейших времён по 2009 г. с магнитудой $MLH > 3,5$ [5]. Вторая таблица – сведения по всем землетрясениям за период с 2004 г. по 2017 г., зарегистрированным сетью сейсмических станций Института геофизических исследований (включая и очень слабые, практически неощутимые для человека) [6]. Так как обе таблицы содержали неоднородные значения разных типов магнитуд ($MPVA$, mb , Ms , MLH , Mw и др.), вычисленных в разные периоды разными способами, для анализа сейсмичности были

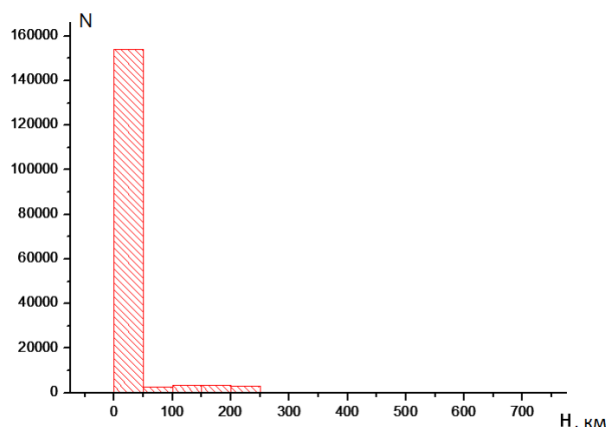
использованы более однородные значения энергетического класса K , которые имеют прямое отношение к высвобожденной в очаге сейсмической энергии. Если значения энергетического класса отсутствовали, то они вычислялись, исходя из значений магнитуд по определённым формулам. Таблицы сейсмичности были объединены в одну общую для периода с древнейших времён по 2017 г., включившую 207 272 землетрясения.

Распределения землетрясений Центральной Азии по глубине расположения очагов и энергетическому классу

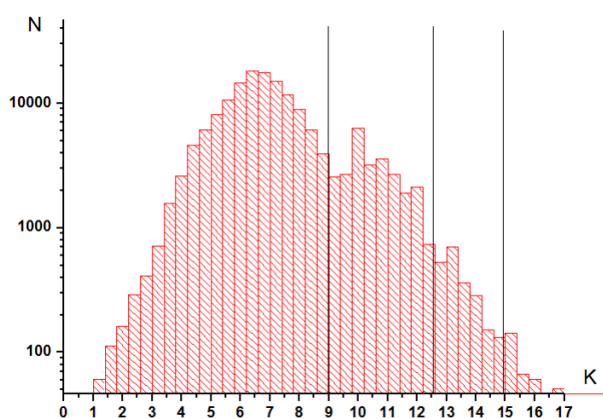
Проведён анализ распределения землетрясений Центральной Азии по глубине расположения очагов и энергетическому классу (рисунок 4).

Из рисунка 4-а видно, что 93 % землетрясений имеют глубину, относящуюся к интервалу 0–50 км, т.е. являются поверхностными или коровыми.

При детализации интервала глубин 0–50 км (рисунок 5-а) оказывается, что подавляющая часть землетрясений распределилась в интервале 0–5 км. Незначительная часть землетрясений – всего 6,8 %, относится к среднефокусным (до глубины 300 км), и только 0,07 % – к глубокофокусным (глубиной более 300 км). Это свидетельствует о том, что большая часть сейсмотектонических процессов происходит практически у поверхности Земли и в земной коре, с глубиной, в верхней мантии, эти процессы затухают. Обращает на себя внимание небольшой пик количества землетрясений (около 5000 событий в разные годы) в интервале глубин 30–35 км, очаги которых распределились над границей Мохо, разделяющей земную кору от верхней мантии (рисунок 5-б).



а) по глубине (через 50 км)



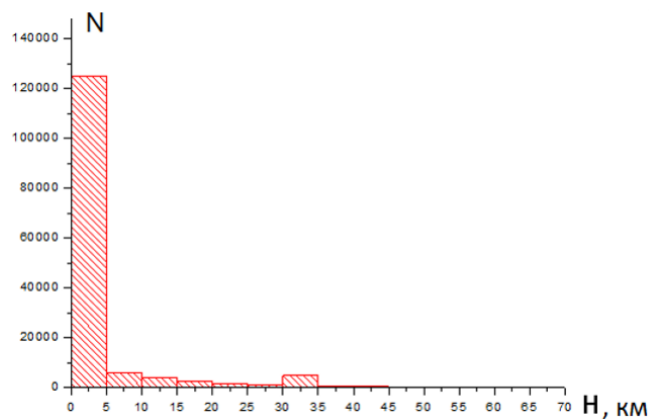
б) по энергетическому классу

Рисунок 4. Гистограммы распределения землетрясений Центральной Азии

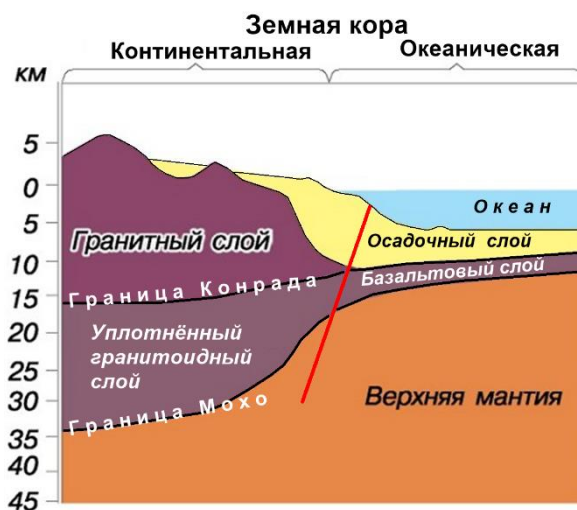
Гистограмма распределения землетрясений Центральной Азии по энергетическому классу (рисунок 4-б) позволяет выделить три группы ощутимых землетрясений: 1) *сильные* – $K \geq 15$ (с примерными магнитуды $MLH \geq 6,5$ в количестве 437); 2) *умеренные* – $K \geq 12,5$ ($MLH \geq 5,5$ в количестве 2438); 3) *слабые* – $K \geq 9$ ($MLH \geq 3,5$ в количестве 27616). Оставшаяся значительная часть слабо ощутимых землетрясений со значениями энергетического класса $K < 9$ ($MLH < 3,5$ в количестве 176781), зарегистрированных инструментально преимущественно с 2004 г., отнесена к группе *очень слабых* землетрясений. По каждой выделенной группе проведен временной анализ с построением гистограмм распределения землетрясений по годам и сезонный анализ распределения землетрясений по месяцам года (рисунок 6).

С целью повышения количественной представительности при построении гистограмм временного анализа сильных, умеренных и слабых землетрясений использовались данные, только начиная с 1900 г. Из гистограммы временного анализа для слабых землетрясений (рисунок 6-в) видно, что представительная информация началась с 1960 г., что связано с пе-

реходом на использование более чувствительных сейсмометров. По группе очень слабых землетрясений (рисунок 6-г) регистрируемые данные стали учитываться с 2004 г. Для сезонного анализа использовались все землетрясения по каждой выделенной группе.



а) по глубине (через 5 км)



б) строение земной коры над границей Мохо [по Дронову В.П. (с авторскими уточнениями)]

Рисунок 5. Распределение землетрясений по глубинам очагов

На гистограммах всех групп землетрясений (рисунок 6-а-г) отмечаются всплески количества сейсмических событий, позволяющие судить о периодах сейсмической активности по годам. Так, например, заметны 5–10-летние периоды активности с количественными максимумами в 1961, 1974, 1984, 1990, 2005, 2009, 2017 гг. На гистограммах распределения землетрясений по месяцам года практически по всем группам – от сильных до слабых землетрясений, – можно выделить периоды сезонной активизации сейсмичности, связанные с периодами весеннего ускорения (март–апрель–май) и осеннего замедления (август–сентябрь–октябрь) вращения Земли при её годовом перемещении по солнечной орбите.

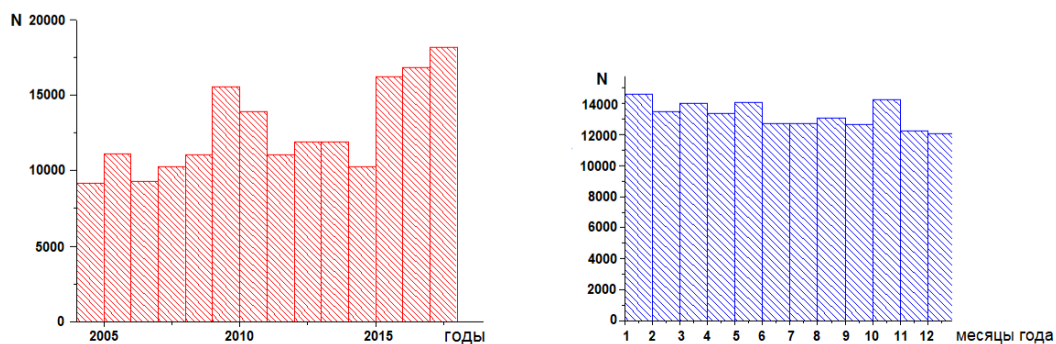
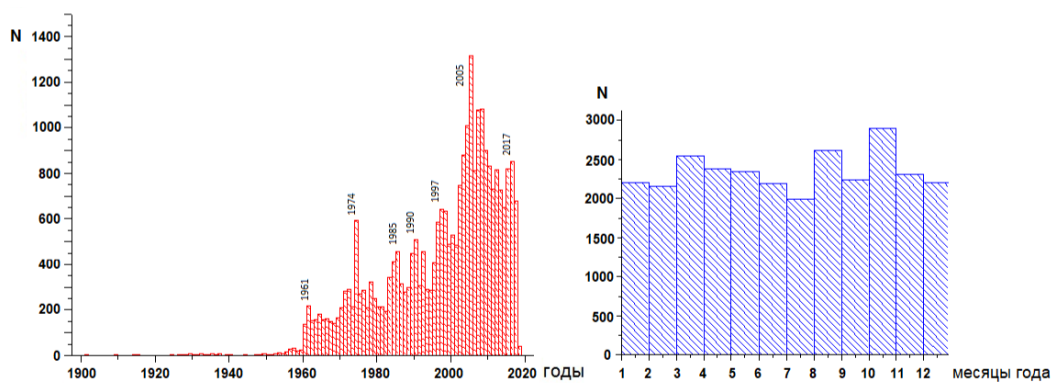
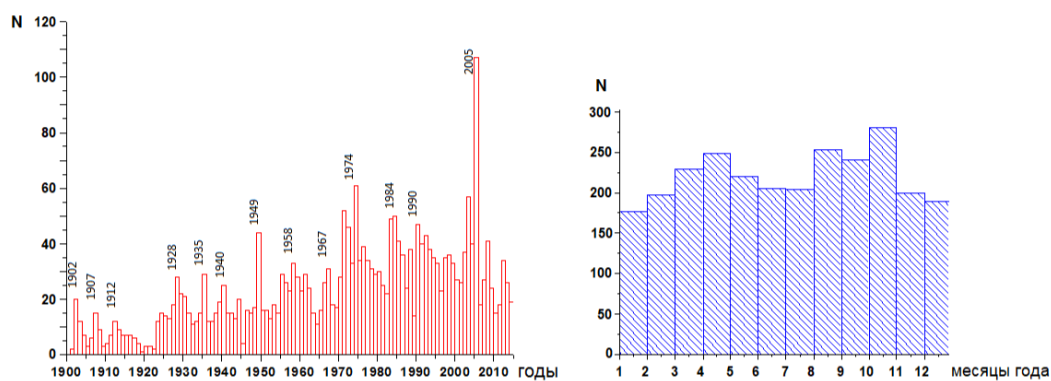
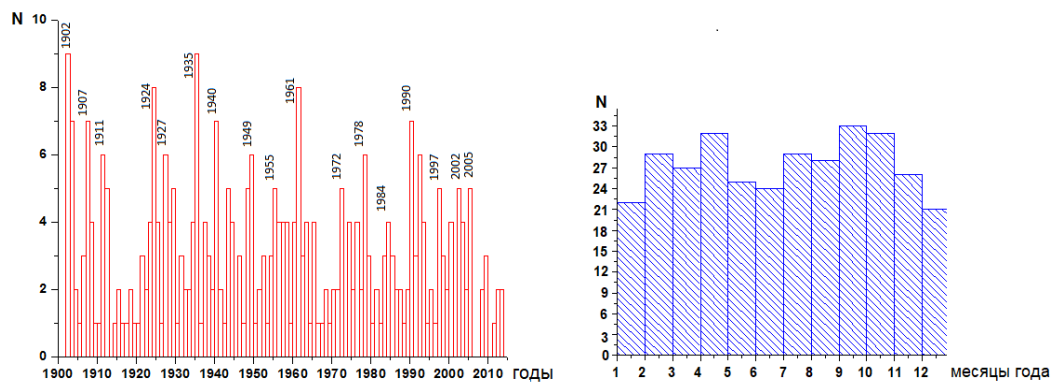


Рисунок 6. Гистограммы временного (по годам) и сезонного (по месяцам) распределения землетрясений Центральной Азии по энергетическим классам

Линейная скорость вращения Земли в зоне экватора равна 495 м/сек. Сезонные замедления и ускорения вращения Земли происходят на величину 5 м/сек. В местах, где напряжённо-деформированное состояние пород достигло критической отметки, сезонное ускорение и замедление вращения Земли, вместе с ежесуточными действиями лунно-солнечных приливных сил, выступают в роли спускового механизма для возникновения землетрясений. В механизмах очагов землетрясений, происходящих в осенний и весенний периоды, должны преобладать взбросо-сдвиги за счёт инерционных подвижек избыточных горных масс, происходящих при ускорении или замедлении вращения Земли. На гистограмме сезонной сейсмичности группы *очень слабых землетрясений* (рисунок 6-г) виден высокий январский количественный всплеск землетрясений. Он связан с увеличением активности ледниковых землетрясений на горных хребтах Тянь-Шаня в зимний период, когда нарастает избыточная масса ледников. Здесь самым холодным месяцем считается февраль, когда температура не поднимается выше -30°C . Количество ледниковых землетрясений зимой (декабрь–март) достигает 30 и более (до 100–130) событий в сутки при среднегодовом количестве 10–20 событий, из которых большая часть происходит в ночной период при смене температурного режима.

Пространственное распределение сейсмичности на картах цифровой модели рельефа и аномалий силы тяжести в свободном воздухе

Далее было рассмотрено пространственное распределение сейсмичности на картах цифровой модели рельефа (рисунок 7) и аномалий силы тяжести в

свободном воздухе (рисунок 8) с наложением эпицентров землетрясений, произошедших с исторических времён до 2017 г. по Центральной Азии, включающей всю территорию Казахстана и часть территорий сопредельных стран. Сейсмические события с $K < 5$ около станций для группы очень слабых землетрясений не приняты во внимание для исключения сгусткового распределения событий вокруг действующих сейсмических станций, регистрирующих их с повышенной чувствительностью из-за близкого расстояния.

Пространственный анализ сейсмичности территории Центральной Азии показал, что большая часть зон сближенных эпицентров землетрясений совпадает с возвышенными формами рельефа с избыточной массой геологической среды (рисунок 7), приуроченными к зонам аномалий силы тяжести в свободном воздухе (рисунок 8). Интенсивность сейсмичности по количеству и силе землетрясений зависит от интенсивности высотного и гравиметрического градиентов в зонах быстрого увеличения значений высоты и силы тяжести, а также от размеров этих зон на периферии площадей, занимаемых локализованными объёмами избыточных масс. Основные подвижки блоков пород с избыточной массой, вызывающих землетрясения, могут происходить в зонах активных тектонических разломов, расположенных (или образовавшихся) у подошвы горных возвышений.

Связь сейсмичности с избыточными горными массами геологической среды устанавливается не только в сейсмичных горных районах, но и в других, менее возвышенных, а также на равнинных асейсмичных территориях.

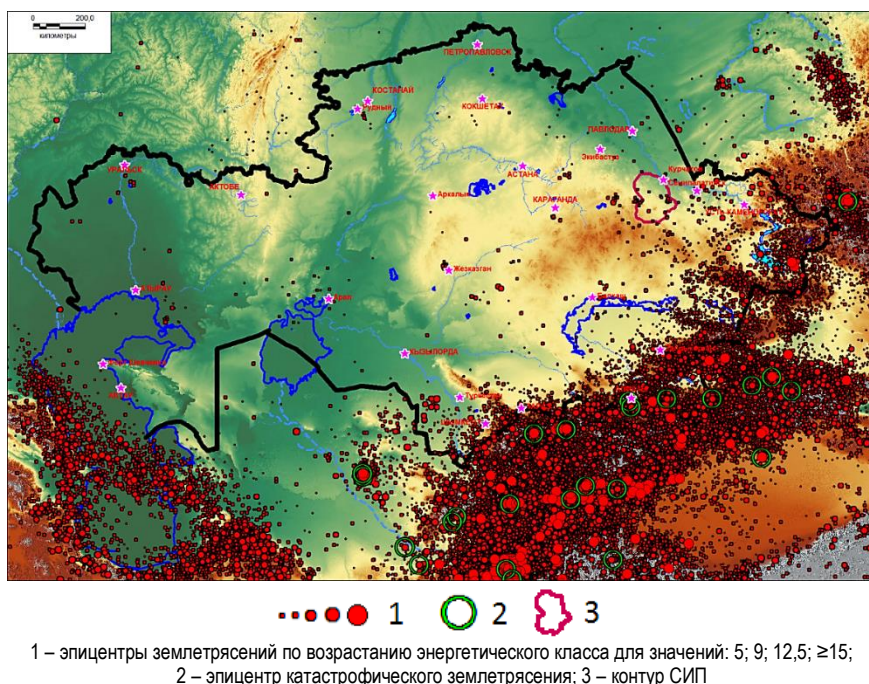


Рисунок 7. Цифровая модель рельефа территории Центральной Азии [<http://gis-lab.info/qa/srtm.html>] с эпицентрами землетрясений с исторических времён по 2017 г.

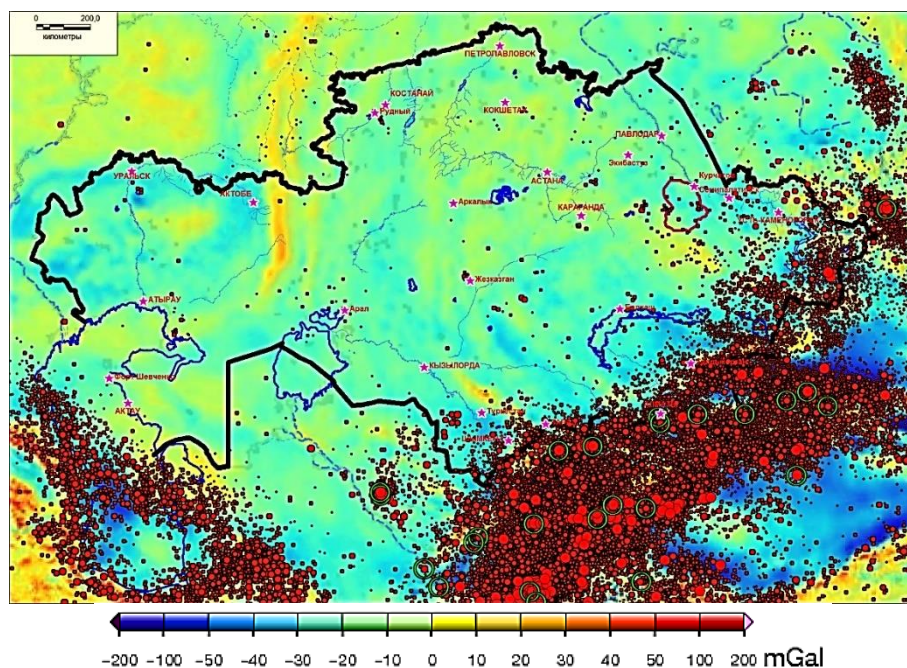
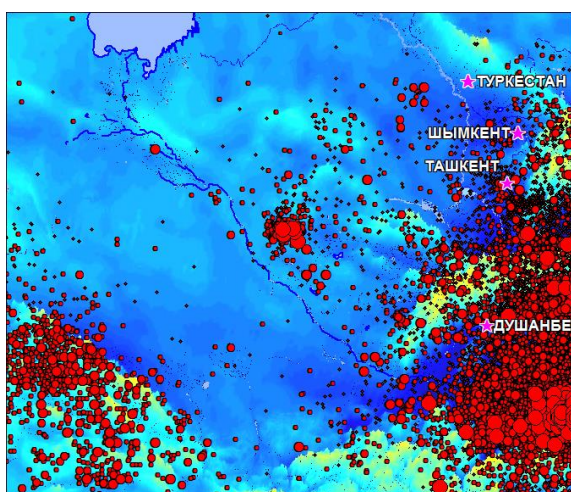
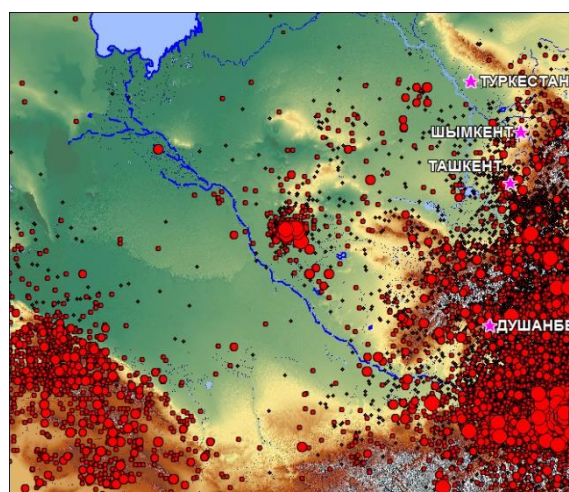


Рисунок 8. Карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе территории Центральной Азии [http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products] с эпицентрами землетрясений с исторических времён по 2017 г.



а) карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе



б) цифровая модель рельефа

Рисунок 9. Распределение эпицентров землетрясений в районе Каракумов и Кызылкумов Центральной Азии с исторических времён до 2017 г.

На равнинных и низменных площадях, перекрытых чехлом рыхлых отложений, аномалии силы тяжести указывают на местонахождение подземных возвышений более плотных коренных пород. На эти массивы горных пород также действуют приливные лунно-солнечные силы, приводя их в напряжённо-деформированное состояние. Примером таких аномалий силы тяжести меньшей интенсивности, чем в горных районах, являются районы Каракумов и Кызылкумов (рисунок 9), к которым приурочены эпицентры единичных слабых землетрясений, хотя по цифровым моделям рельефа здесь нет возвышений земной поверхности.

На низменных равнинных территориях с мощным чехлом рыхлых отложений в Прикаспийской впадине, а также в акватории Каспийского моря аномалии силы тяжести выявляют сводовые поднятия с залежами углеводородов над выступами более плотных коренных пород на глубине 5–10 км (рисунок 8). При добыче углеводородов в этих районах с напряжённо-деформированным состоянием пород зарегистрированы техногенные землетрясения, связанные с изменением массы технологической среды на глубинах добычи.

Аналогичная ситуация, но меньшей интенсивности складывается в районах добычи твёрдых полез-

ных ископаемых (угля, железных и других руд), где образуются громадные отвалы (как внешние, так и внутренние) избыточной массы рыхлых вскрышных пород. Отвалы периодически находятся под воздействием приливных лунно-солнечных сил с увеличенной амплитудой вертикальных смещений из-за их рыхлости, что также приводит к дестабилизации недр на глубине. В районе г. Рудного регистрируются ощутимые землетрясения, связанные, по всей видимости, с добычей железных руд в глубоких карьерах и с громадными внешними отвалами рыхлых вскрышных пород, избыточная масса которых достигает объёмов искусственно созданных водохранилищ, где также происходят техногенные землетрясения. Известны случаи сильных техногенных землетрясений на Кузбассе на громадных угольных разре-

зах с внутренними отвалами избыточных масс рыхлых вскрышных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ сейсмичности на картах аномалий силы тяжести и цифровой модели рельефа позволяет установить, что как локализованные объёмы более плотных горных пород под дневной поверхностью, так и возвышенные массивы пород различной плотности на дневной поверхности, совпадающие с аномалиями силы тяжести в свободном воздухе, представляют собой гравитационно-возмущающие избыточные массы геологической среды, генерирующие сейсмичность при периодическом действии лунно-солнечных приливных сил, которые приводят породы на глубине в напряжённо-деформированное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великанов, А.Е. Учёт гравитационных факторов геологической среды при оценке сейсмической опасности для ядерных установок на территории Семипалатинского полигона / А.Е. Великанов, И.Л. Аристова // Тезисы X Международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий», 06–10 августа 2018 г, г. Алматы. – С. 98–102.
2. GIS-Lab. Описание и получение данных SRTM [Электронный ресурс, 2014]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/srtm.html>.
3. Center for Space Research. At the confluence of science, engineering, space, and high-performance computing [Электронный ресурс, 2018]. – Режим доступа: <https://www.csr.utexas.edu>.
4. International Gravimetric Bureau (BGI). Data/Products [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products>.
5. Mikhailova, N.N. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009 / N.N. Mikhailova, A.S. Mukambayev, I.L. Aristova, G. Kulikova, S. Ullah, M. Pilz, D. Bindi // Annals of Geophysics. – 2015. – Vol 58, No 1. – 9 p.
6. Казахстанский национальный центр данных. Каталог землетрясений KNDC [Электронный ресурс, 2018]. – Режим доступа: <http://www.kndc.kz/index.php/ru/sejsmicheskie-byulleteni/automatic-bulletin>.

ОРТАЛЫҚ АЗИЯ ҮЛГІСІНДЕ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ОРТАНЫҢ АРТЫҚ МАССАЛАРЫМЕН СЕЙСМИКАЛЫЛЫҚТЫҢ БАЙЛАНЫСЫ

А.Е. Великанов, И.Л. Аристова

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Әр тығыздығындағы таужыныстар үстіртері түрінде жер бетінде және, кіші бөлігінде, жер беті астында, жоғары тығыздығымен таужыныстардың шектелген көлемдері түрінде, жер қыртысының *жергіліктелген артық массаларымен* сейсмикалықтың байланысы туралы деректері мен үлгілері келтіріледі. Бұл байланыстар, жоғары дәлді жерсеріктік түсірулер нәтижелері бойынша алынған белдемнің цифрлық модельдерінің түбегейлі карталары және бос ауада ауырлық күшінің аномалиялары түріндегі геодезиялық және гравиметрлік деректерін қолданып, жаһандық және аймақтық масштабында қарастырылған.

THE CONNECTION OF SEISMICITY WITH EXCESS MASSES OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT BY THE EXAMPLE OF CENTRAL ASIA

A.E. Velikanov, I.L. Aristova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The facts and examples of seismicity connection with localized excess masses of the earth's crust, located both on the earth's surface in the form of different elevations of different density rocks, and to a lesser extent at depths under the day surface in the form of limited volumes of rocks with high density are described. These relationships are shown both globally and regionally for Central Asia using geodetic and gravimetric data in the form of detailed maps of digital elevation models and free-air gravity anomalies obtained from high-precision satellite imagery.