

УДК 550.34

НОВЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНАХ СЕВЕРНЫХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

²⁾ Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассматриваются пространственно-временные характеристики сейсмичности в трех областях северных Курил и южной Камчатки. Ранее в этих областях были выделены кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, сформировавшиеся за период 01.01.1973–01.01.2009 гг. Показано, что за последние 4.5 года параметры некоторых кольцевых структур существенно изменились, в первую очередь, в области между 52° и 53° N. Аналогичные изменения наблюдались перед некоторыми сильными и сильнейшими землетрясениями в других зонах субдукции. Это дает основание предполагать подготовку сильных землетрясений в рассматриваемых областях.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиями последних лет [1–7] установлено, что перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции, как правило, формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км (ниже для простоты они называются соответственно “мелкими” и “глубокими” кольцами). Показано также, что эпицентры главных событий, как правило, располагаются вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности [1, 2, 4–7]. Получены корреляционные зависимости размеров таких кольцевых структур, а также пороговых значений магнитуд от энергии главных событий (M_w) для разных регионов [2, 4, 6, 7], что позволяет прогнозировать по этим параметрам магнитуды готовящихся землетрясений. Вместе с тем, на примере северо-восточной Японии показано, что характеристики кольцевых структур могут существенно изменяться в последние несколько лет перед сильным сейсмическим событием [4, 7]. В целом результаты проведенных исследований показали, что для повышения точности оценок магнитуды положения очаговых зон готовящихся землетрясений необходимо вести регулярный мониторинг параметров колец сейсмичности в интересующих районах. В данной статье проводится анализ изменения характеристик кольцевых структур в трех областях северных Курил и южной Камчатки, где ранее параметры сейсмичности были исследованы по состоянию до 01.01.2009 г. [6].

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В районе Курило-Камчатской дуги (рисунки 1, 2) Тихоокеанская плита погружается под Североамериканскую со скоростью ~7–8 см/год. В [8] приведены данные о результатах анализа скоростей деформации в районах северных Курил и Камчатки, полученные с использованием *Global Positioning System* (GPS). Из рисунка 1 следует, что на самом севере Курил наблюдаются высокие скорости скольжения

океанической плиты. В то же время в районе южной Камчатки скорости скольжения резко падают, что соответствует существованию “зацепов” (asperities), на которых происходит накопление деформаций.

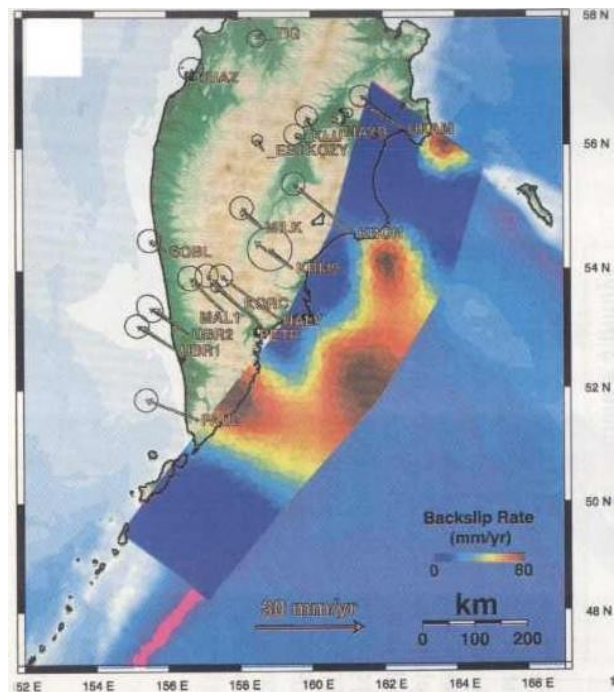


Рисунок 1. Район Курило-Камчатской дуги. Распределение скоростей смещения земной поверхности по данным GPS [8]

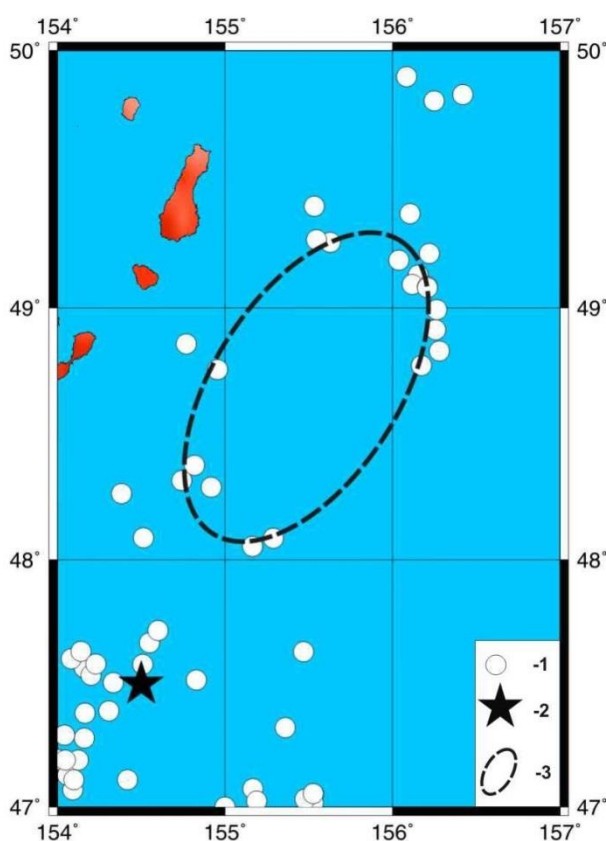
Начиная с 1900 г., в районе между 47° и 56.5° N произошло 9 сильных неглубоких землетрясений с $M_w \geq 7.5$, в том числе 3 события с $M_w \geq 8.0$ (таблица 1, рисунок 2).

Великое Камчатское землетрясение 4 ноября 1952 г. ($M_w=9.0$) было третьим по силе сейсмическим событием XX-го века, равным по магнитуде Суматра-Андаманскому землетрясению 26.12.2004 г. и землетрясению Тохоку 11.03.2011 г. Очаг этого события имел размеры около 600 км, он породил цуна-

чатского землетрясения 04.11.1952 г. (рисунок 2); к юго-западу от него находится очаговая зона землетрясения 01.05.1915 г. ($M_w=7.9$).

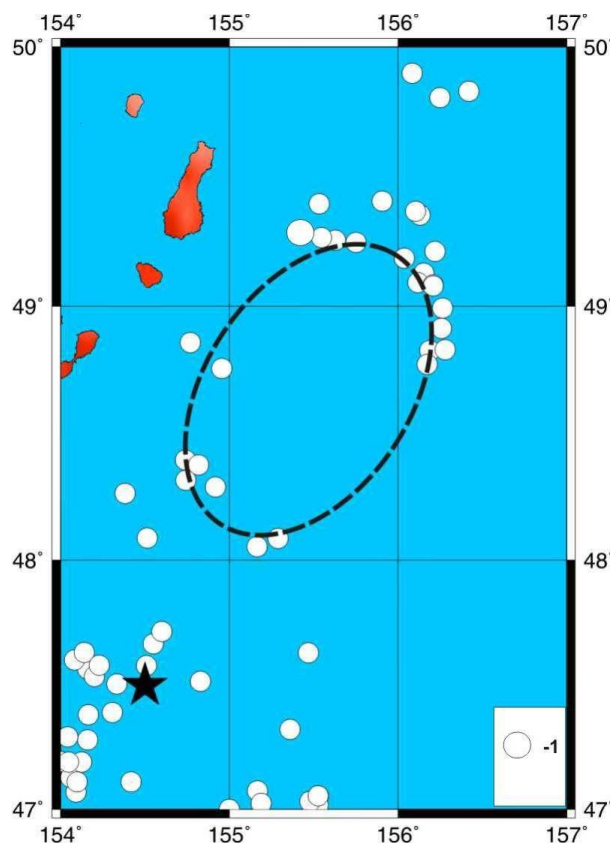
На рисунке 3-в представлена зависимость магнитуд землетрясений в области мелкого кольца от времени, из которой следует, что с 1974 по 1998 гг. ве-

личины M не превышали 5.7. В то же время в 2004–2012 гг. наблюдался резкий рост уровня магнитуд – до 6.2–6.5. Следует отметить, что наибольшая скорость сеймотектонической деформации (СТД) в области кольцевой структуры имела место в 2012 г., когда произошли три события с $M=5.6–6.5$.



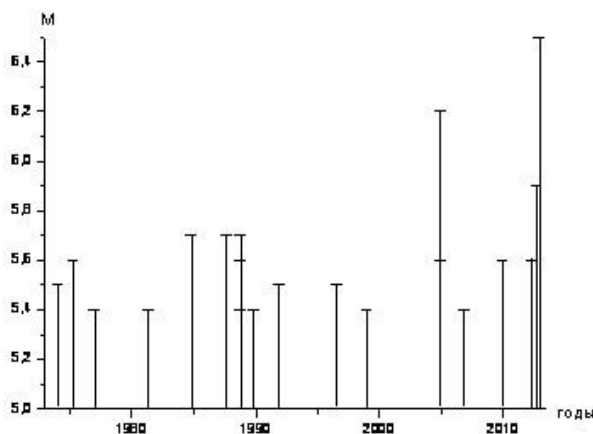
1 – эпицентры землетрясений ($5.4 \leq M < 6.5$).
2 – эпицентр землетрясения 01.05.1915 г. 3 – мелкое кольцо

а) до 01.01.2009 г.



Большой кружок – $M \geq 6.5$.
Остальные обозначения – на рисунке 3а

б) до 01.07.2013 г.



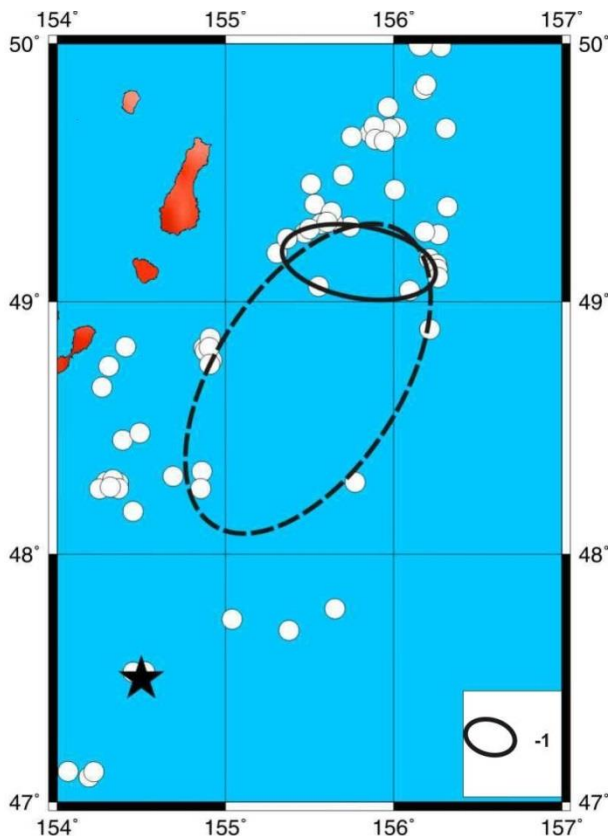
в) зависимость величин M от времени (в области мелкого кольца)

Рисунок 3. Район северных Курил. Характеристики сейсмичности для глубин 0–33 км

На рисунке 4 показаны аналогичные данные для диапазона глубин 34–70 км. В данном случае к 01.01.2009 г. четко проявилось меньшее по размеру глубокое кольцо, вытянутое в субширотном направлении (1–70 км, $M_{p2}=5.3$, см. рисунок 4-а). Следует отметить, что через 4.5 года эта кольцевая структура не изменилась, несмотря на то, что в данной области происходили события с $M>6.0$ (рисунок 4-б). Из ри-

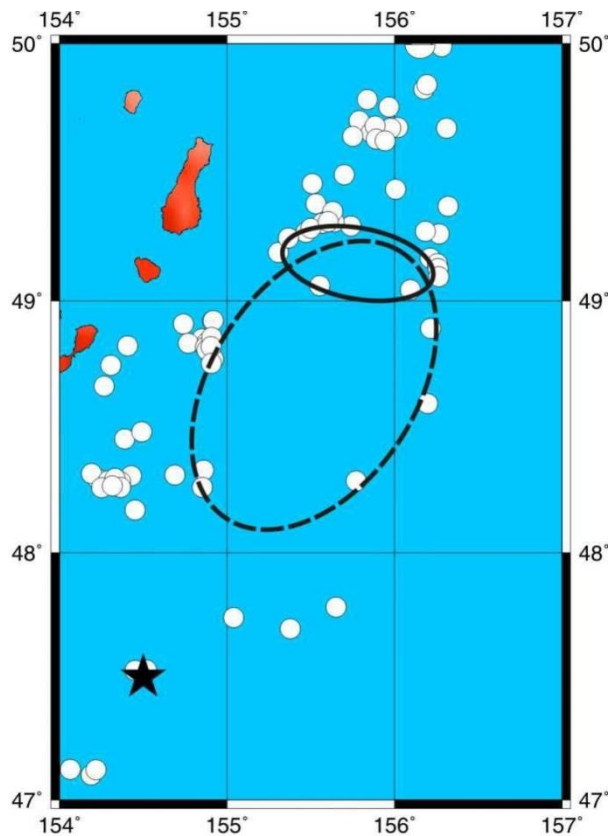
сунка видно, что мелкое и глубокое кольца пересекаются в области между 49.0° и 49.3° N.

На рисунке 4-в представлена зависимость $M(T)$ для области глубокого кольца. Видно, что наибольшая магнитуда ($M_{max}=6.3$) наблюдалась здесь в 1983 г., а максимальная скорость СТД – в 1981–1988 гг., когда произошло 5 событий с $M=5.5-6.3$. После 2003 г. землетрясений с $M \geq 5.3$ в области глубокого кольца не зарегистрировано.



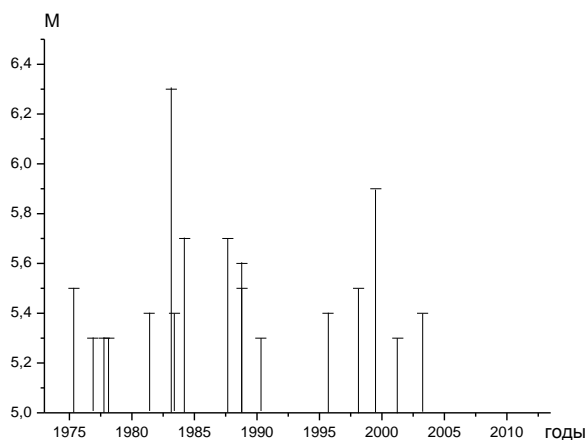
1 – глубокое кольцо. Малые кружки – $5.3 \leq M < 6.5$.
Остальные обозначения – на рисунке 3-а

а) до 01.01.2009 г.



Обозначения – на рисунке 4-а

б) до 01.07.2013 г.



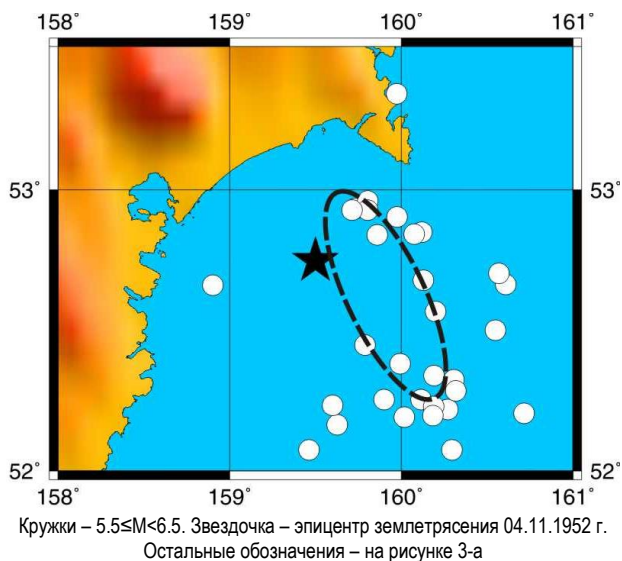
в) зависимость величин M от времени (в области глубокого кольца)

Рисунок 4. Район северных Курил. Характеристики сейсмичности для глубин 34–70 км

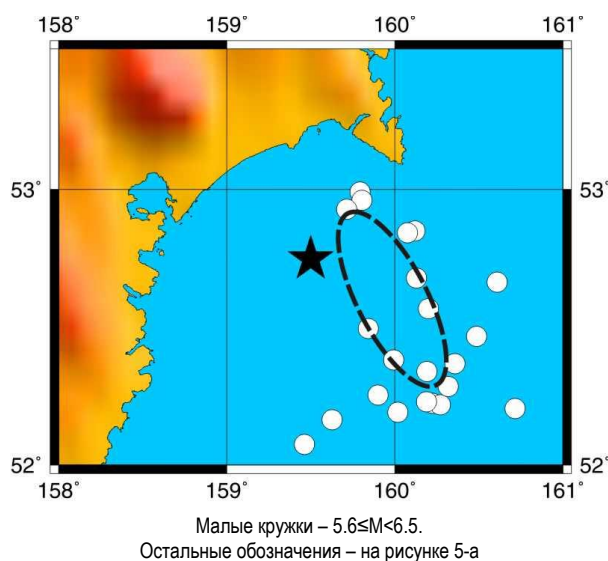
На рисунках 5, 6 приведены соответствующие данные для второй исследуемой области – района южной Камчатки ($52.0-53.5^{\circ}$ N, $158-161^{\circ}$ E). На рисунке 5-а показаны эпицентры землетрясений с глубинами 0–33 км, зарегистрированных до 01.01.2009 г. В данном случае сформировалось нечетко выраженное мелкое кольцо ($M_{p1}=5.5$, $L\sim 90$ км), расположенное к югу от полуострова Шипунский и вытянутое в северо-северо-западном направлении. Существенно, что к 01.07.2013 г. более четко проявилось новое кольцо чуть меньшего раз-

мера ($L\sim 80$ км), но с большей величиной M_{p1} (5.6), ориентированное в том же направлении (рисунок 5-б). Интересно, что рядом с западной границей мелкого кольца находился эпицентр Великого Камчатского землетрясения 04.11.1952 г.

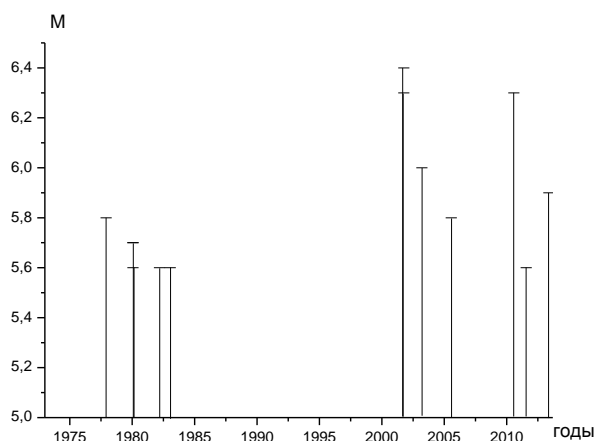
На рисунке 5-в представлена зависимость $M(T)$ для области нового мелкого кольца. Из рисунка следует, что график имеет U-образную форму; максимальная скорость СТД наблюдалась в 1977–1983 и 2001–2013 гг. Величина M_{max} равнялась 6.4 (для землетрясения 10.08.2001 г.).



а) до 01.01.2009 г.



б) до 01.07.2013 г.



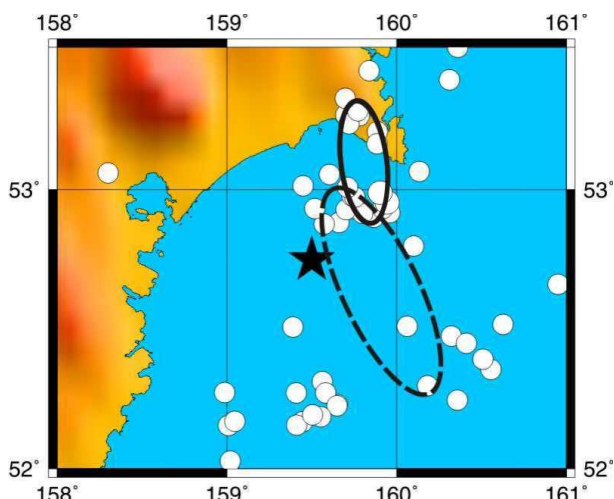
в) зависимость M землетрясений от времени (в области мелкого кольца)

Рисунок 5. Район южной Камчатки ($52.0-53.5^{\circ}$ N, $158-161^{\circ}$ E).
Характеристики сейсмичности для глубин 0–33 км

Рисунок 6-а иллюстрирует характеристики глубокой сейсмичности за период до 01.01.2009 г. ($M_{п2}=5.2$). В данном случае проявилась нечеткая кольцевая структура, вытянутая в субмеридиональном направлении (1~50 км), которая на юге пересеклась с мелким кольцом. За последующие 4.5 года эта структура не изменилась (рисунок 6-б); вместе с тем к юго-востоку от нее появилось новое, гораздо более четко выраженное кольцо сейсмичности

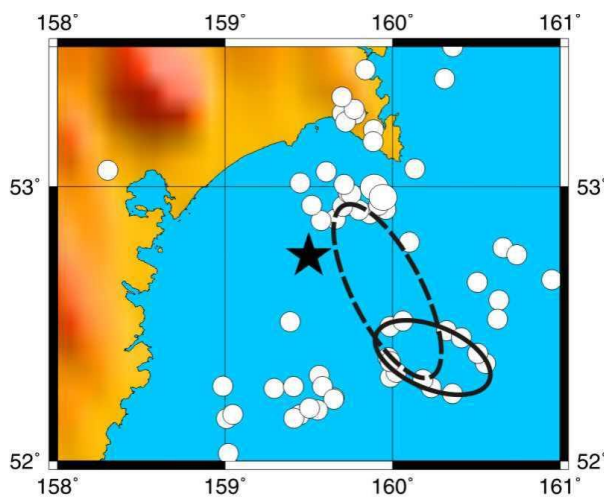
(1~50 км), ориентированное в запад-северо-западном направлении. Новая кольцевая структура пересекается с новым мелким кольцом в его юго-восточной части.

На рисунке 6-в показана зависимость $M(T)$ для нового глубокого кольца. Видно, что наибольшая скорость СТД здесь наблюдалась в 2011–2013 гг.; величина M_{max} равна 6.1 (для землетрясения 21.05.2013 г.).



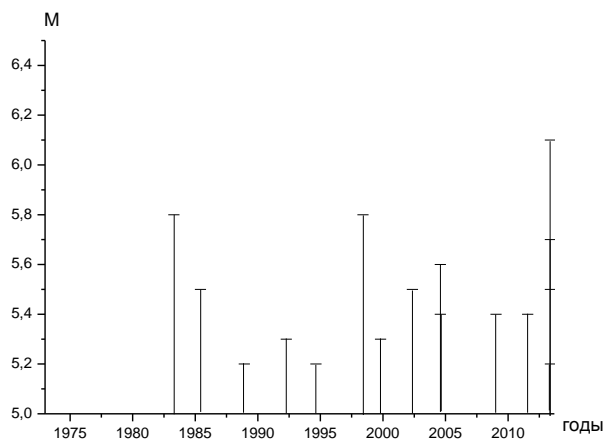
Малые кружки – $5.2 \leq M < 6.5$. Остальные обозначения – на рисунке 4-а

а) до 01.01.2009 г.



Малые кружки – $5.2 \leq M < 6.5$. Остальные обозначения – на рисунке 6-а

б) до 01.07.2013 г.



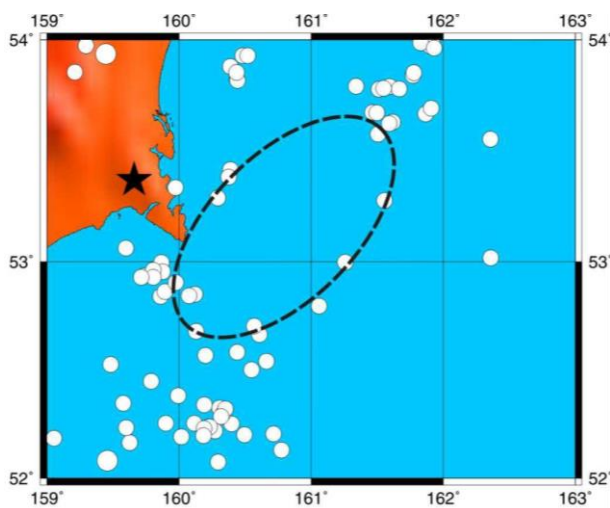
в) зависимость величин M от времени (в области глубокого кольца)

Рисунок 6. Район южной Камчатки ($52.0-53.5^\circ N$, $158-161^\circ E$).
Характеристики сейсмичности для глубин 34–70 км

На рисунках 7, 8 представлены характеристики сейсмичности для третьей рассматриваемой области – района южной Камчатки (52.0–53.5° N, 158–161° E). Из рисунка 7-а следует, что к 01.01.2009 г. здесь сформировалось довольно большое мелкое кольцо (M_{п1}=5.3, L~140 км), вытянутое в северо-восточном направлении. Кольцо почти касалось Шипунского полуострова. К западу от кольца сейсмичности расположен эпицентр землетрясения

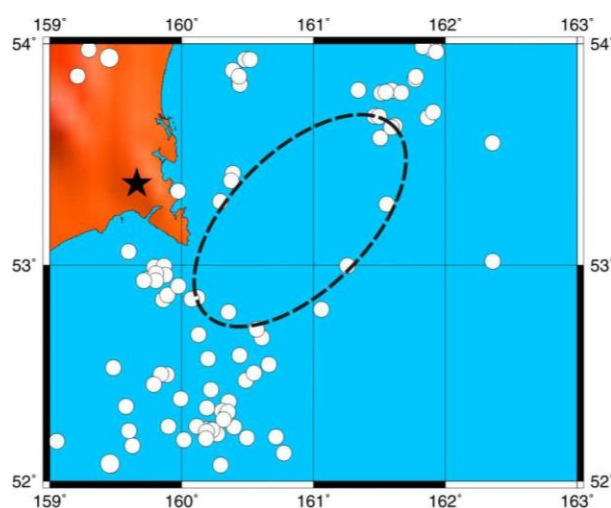
04.05.1959 г. (M_w=8.0). Анализ новых данных (рисунок 7-б) показал, что к 01.07.2013 г. мелкое кольцо почти не изменилось (L~140 км).

На рисунке 7-в показана зависимость M(T) для области мелкого кольца. Видно, что магнитуда самого сильного события M_{max} здесь равна 6.3 (для землетрясения 08.10.2001 г.); наибольшие скорости СТД наблюдались в 1973 и 2001–2005 гг.



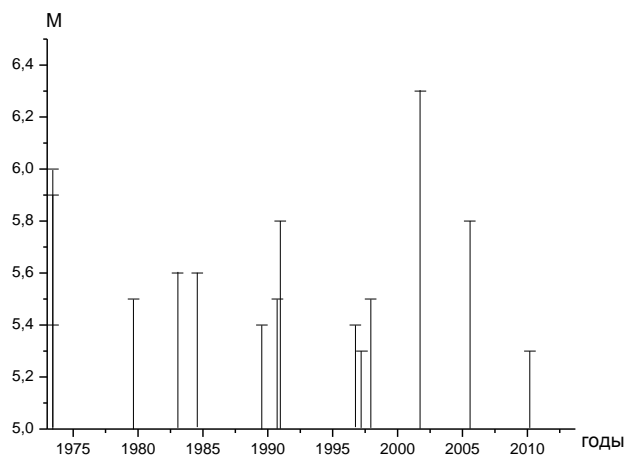
Малые кружки – 5.3 ≤ M < 6.5. Звездочка – эпицентр землетрясения 04.05.1959 г. Остальные обозначения – на рисунке 3-а

а) до 01.01.2009 г.



Обозначения – на рисунке 7-а

б) до 01.07.2013 г.

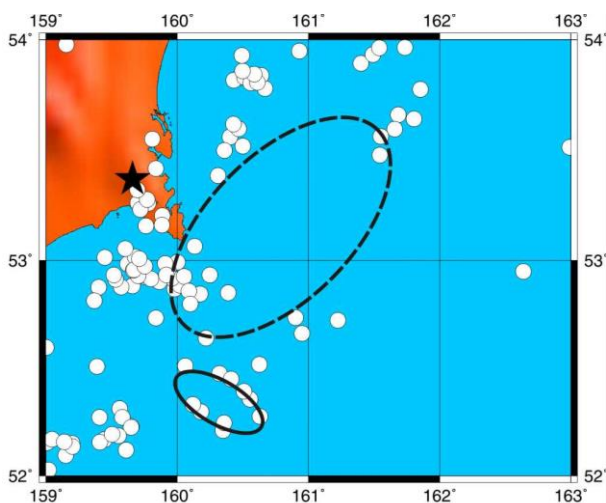


в) зависимость величин M от времени (в области мелкого кольца)

Рисунок 7. Район южной Камчатки (52.0–54° N, 159–163° E). Характеристики сейсмичности для глубин 0–33 км

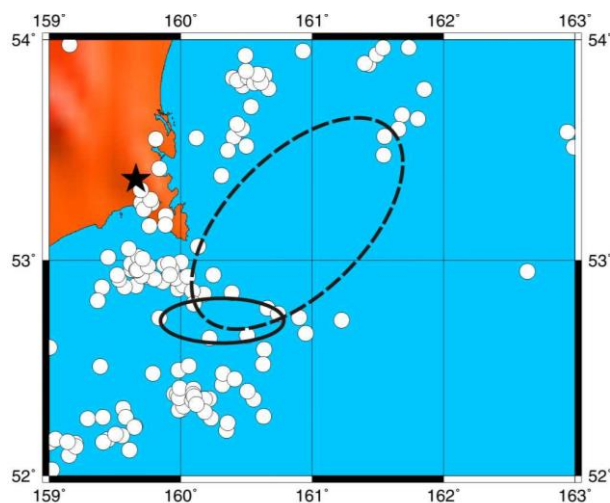
На рисунке 8 представлены характеристики сейсмичности на глубинах 34–70 км. К 01.01.2009 г. к югу от Шипунского п-ова сформировалось глубокое кольцо с M_{п2}=5.0 (рисунок 8-а), практически совпадающее с глубоким кольцом, показанным на рисунке 6б (l~50 км). Мелкое и глубокое кольца почти касались в области около 52.5° N. Из рисунка 8-б следует, что к 01.07.2013 г. это кольцо распалось; вместе с тем начала прорисовываться новая глубокая

кольцевая структура, расположенная чуть севернее и вытянутая в субширотном направлении (M_{п2}=5.0, l~50 км). Новое мелкое и глубокое кольца пересекаются около широты 52.8° N. Рисунок 8-в демонстрирует, что в области нового глубокого кольца скорость СТД резко выросла в 2011–2013 гг., хотя величина M_{max} относительно мала (5.5 для землетрясения 21.05.2013 г.).



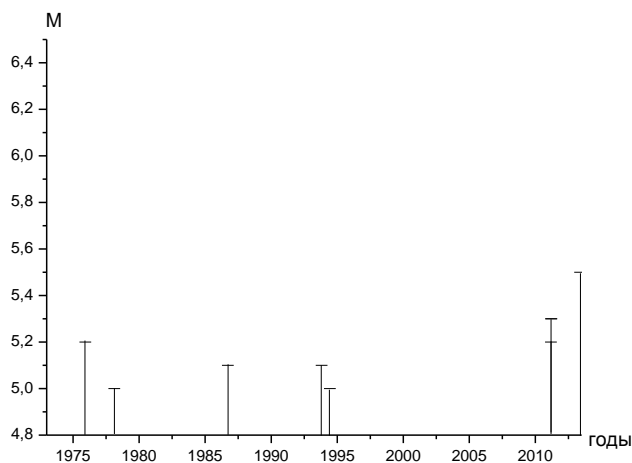
Малые кружки – $5.0 \leq M < 6.5$. Остальные обозначения – на рисунке 7-а

а) до 01.01.2009 г.



Обозначения – на рисунке 8-а

б) до 01.07.2013 г.



в) зависимость M землетрясений от времени (в области глубокого кольца)

Рисунок 8. Район южной Камчатки ($52.0-54^\circ N$, $159-163^\circ E$).
Характеристики сейсмичности для глубин 34–70 км

Оценка магнитуд возможных сильных землетрясений. Для прогнозирования величин M_w использованы корреляционные зависимости размеров мелких и глубоких колец сейсмичности, а также величин $M_{п1}$ и $M_{п2}$ от магнитуд главных событий для северо-запада Тихого океана (районы северо-восточной Японии, Курил, Камчатки и запада Алеутских островов) [10]. Эти зависимости имеют достаточно высокие значения коэффициентов корреляции r :

$$M_{п1} = -1.72 + 0.83 M_w, r=0.88, \quad (1)$$

$$M_{п2} = -1.14 + 0.72 M_w, r=0.96. \quad (2)$$

В таблице 2 приведены результаты оценки средних величин M_w , полученные по формулам (1) и (2).

Таблица 2. Оценки магнитуд возможных сильных землетрясений

$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$	$M_{п1}$	$M_{п2}$	M_w
47,0–50,0	154,0–157,0	5.4	5.3	8.8 ± 0.2
52,0–53,5	158,0–161,0	5.6	5.2	8.8 ± 0.2
52,0–54,0	159,0–163,0	5.3	5.0	8.5 ± 0.2

ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные в статье и ранее полученные [6] данные свидетельствуют о том, что в районах северных Курил и южной Камчатки достаточно четко проявляются мелкие и глубокие кольцевые структуры сейсмичности, аналогичные выявленным в других зонах субдукции [1, 2, 4, 5, 7]. Корреляция кольцевых структур и неоднородностей поля поглощения короткопериодных поперечных волн [3] позволила сделать вывод, что образование колец сейсмичности облегчает подъем глубинных флюидов и в целом отражает процессы самоорганизации геологических структур [11], ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли. Положение эпицентров сильных землетрясений вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности [1, 2, 4, 5, 7], скорее всего, связано с тем, что в таких областях достигается наибольшая мощность двухфазного слоя с заметной долей флюидов [3, 5]. В случае, когда флюиды образуют связную сеть, на кровле такого слоя обеспечивается концентрация напряжений [12], приводящая в конечном счете к подвижке при сильном землетрясении. Этот эффект, а также зависимость пороговых значений магнитуды от энергии готовящегося события [2, 4, 6, 7] позволяют прогнозировать положение очага и магнитуду сильного землетрясения. Проведенный в [4, 7] анализ характеристик сейсмичности в районе северо-восточной Японии показал, что за последние 2–3 года перед землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. резко изменились характеристики мелкого кольца сейсмичности в окрестностях будущего эпицентра, в то время как для других кольцевых структур, располагавшихся в очаговой зоне, такие изменения были незначительными. За два года до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. ($M_w=9.0$) также существенно увеличилась скорость СТД в области мелкой кольцевой структуры, сформировавшейся перед этим событием [3]. Такие факты дают основание предполагать, что в ближайшие годы сильное землетрясение наиболее вероятно во втором из рассмотренных районов, где резко изменились характеристики кольцевых структур начиная с 2010 г. При этом размер очаговой зоны может быть в несколько раз больше размеров отдельных кольцевых структур и, в частности, она может включать также кольцевые структуры, образовавшиеся в третьей области. Аналогичный эффект наблюдался,

например, при землетрясении Тохоку 11.03.2011 г., когда в очаговую зону вошли три пары колец сейсмичности [7].

Оценки величин M_w для возможных сильных землетрясений, приведенные в таблице 2, следует рассматривать лишь в качестве первого приближения. Возможно, оценки завышены, поскольку основаны на корреляционных зависимостях, полученных для большого района. Не исключено, что отдельно для северных Курил и южной Камчатки такие зависимости могут заметно отличаться от зависимостей, описанных формулами (1) и (2).

Сопоставление с полем скоростей деформации, полученным методом GPS [8], показало, что в первом изученном районе, в области пары колец сейсмичности, наблюдается высокая скорость скольжения Тихоокеанской плиты, погружающейся под Охотское море. Это может свидетельствовать о незначительном накоплении деформаций в данной области. В то же время областям второй и третьей пар кольцевых структур соответствуют контрастные зоны – высокая скорость скольжения к западу от этих структур резко изменяется на очень низкую к востоку от них. Это свидетельствует о существовании зацепов к востоку от кольцевых структур, где происходит накопление деформаций [8]. Таким образом, данные о кольцевых структурах и геодезические данные говорят о возможной подготовке сильного землетрясения в этих областях.

Следует отметить, что пара колец во втором районе попадает в очаговые зоны двух сильнейших землетрясений – 17.05.1841 г. ($M=8.4$) и 04.11.1952 г. (рисунок 2 [8]). Вместе с тем, анализ данных о цунами, сопровождавшем Великое Камчатское землетрясение, показывает, что максимальные подвижки при этом событии наблюдались к югу от $52^\circ N$, т.е. к северу от указанной параллели высвобождение деформации было сравнительно небольшим [13]. Отсюда может следовать, что в области второй пары колец сейсмичности готовится аналог землетрясения 1841 г. (это не противоречит оценкам среднего периода повторяемости для сильных землетрясений в районе Курило-Камчатской дуги [9]). С учетом того, что эта область находится вблизи г. Петропавловск-Камчатский, здесь необходимо проводить постоянный мониторинг различных геофизических и геохимических полей с целью среднесрочного прогноза сильного землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 425. № 4. – С. 539 – 542.
2. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 429. № 1. – С. 106–109.
3. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2010. – № 6. – С. 34–51.

4. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ($M_w=9.0$) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2011. – Т. 440. № 2. – С. 246–249.
5. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, $M_w=8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2011. – Т.12. № 3. – С.22–33.
6. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в районах Курил и Камчатки / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. 2009. – Вып. 3. – С. 76–87.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северо-восточной Японии и катастрофическое землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. ($M_w=9.0$) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. 2012. – Вып. 1. С. 121–130.
8. Burgmann, R. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone / R. Burgmann, M. Kogan, M. Steblov, G. Hillel, V. Levin, E. Apel // J. Geophys. Res. 2005. – V. 110. B07405.
9. Федотов, С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006-2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения / С.А. Федотов, А.В. Соломатин, С.Д. Чернышев // Вулканология и сейсмология. 2007. – № 3. – С. 3–25.
10. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на периферии Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. 2013. – Вып. 2.
11. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.
12. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // Pure Appl. Geophys., 1984/1985. – V. 122. – P. 492–530.
13. Innes, B. Slip distribution of the 1952 Kamchatka great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical record / B. Innes, R. Weiss, J. Bourgeois, T. Pinegina // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2010. – V. 100. N 4. – P. 1695–1709.

СОЛТҮСТІК КУРИЛДЕР ЖӘНЕ КАМЧАТКА АУДАНДАРЫНДА СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ ЖАҢА САҚИНАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ *РФА Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Солтүстік Курилдер мен Камчатканың үш аймақтарында сейсмикалықтың кеңістік-уақыттық сипаттамалары қарастырылуда. Бұрын бұл аймақтарда, тереңдіктің екі ауқымында – 0–33 және 34–70 км., 1973 ж. 01.01 – 2009 ж. 01.01 кезеңінде қалыптастырылған сейсмикалықтың сақиналы құрылымдары айқындалған. Соңғы 4.5 жыл ішінде сейсмикалықтың кейбір құрылымдары, бірінші кезегінде $N 52^\circ$ және 53° арасындағы аймағында, едәуір өзгерілгені көрсетілген. Тәрізді өзгерістер кейбір қатты және өте қатты жерсілкінулер алдында субдукцияның басқа зоналарында байқалған. Бұл, қарастырылудағы аймақтарда, қатты жерсілкінулер дайындалуда болуын жорамалдауына негізін береді.

NEW RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE REGIONS OF KURILS AND KAMCHATKA

¹⁾ Yu.F. Kopnichev, ²⁾ I.N. Sokolova

¹⁾ *Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²⁾ *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

This paper presents spatial-temporal seismicity characteristics in three areas of the northern Kurils and southern Kamchatka. Earlier ring-shaped seismicity structures were picked up in these areas in two depth ranges: 0–33 and 34–70 km, which have been formed during a period of 01.01.1973-01.01.2009. It was shown, that after this period during the last 4.5 years parameters of some ring-shaped structures changed essentially, first of all within the range between 52° and 53° N. Similar changes were observed prior to some large and great earthquakes in the other subduction zones. This gives a reason to suggest a preparation for large earthquakes in these areas.