

УДК: 550.343

УЧЕТ ПРИЛИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РЕЖИМ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ДЛЯ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

Белослюдов О.М., Узбеков Н.Б., Бахарева Л.Т.

Институт сейсмологии МОН РК, г. Алматы, Республика Казахстан, ombel@mail.ru

Введение

Территория юго-востока Казахстана является одной из самых сейсмоопасных в континентальной Азии, на которой за исторически короткое время произошел ряд разрушительных землетрясений, два из которых – Чиликское (1889 г.) и Кеминское (1911 г.) – имеют магнитуду более 8 (интенсивность в эпицентре $J_0 = 10\text{--}11$ баллов) и вошли в ранг мировых сейсмических катастроф. В последнее время в регионе наблюдается увеличение сейсмической активности, зарегистрирован ряд землетрясений с $K > 13$ (рис. 1), что делает актуальным развитие методов средне- и краткосрочного прогноза. Действующая система сейсмологического мониторинга включает режимные сейсмические, геофизические и гидрогеологические наблюдения на сети комплексных станций. Наличие достаточно плотной сети цифровых сейсмических станций на территории юго-восточного Казахстана позволяет регистрировать более 12 000 землетрясений в год, что позволяет развивать и применять на практике методы среднесрочного и краткосрочного прогноза сильных, с $M > 5.5$, сейсмических событий. на основе анализа слабой сейсмичности. Основные параметры, применяющиеся при прогнозе: активизация-затишье RTL , локализация сейсмичности $R_{\text{лок.}}/T_{\text{лок.}}$, отношение скоростей сейсмических волн V_p/V_s , нормированная активизация A_{L9}/A_{L8} , анизотропия скоростей продольных волн V_{py}/V_{px} и т.д. Проблема исследования реакции ограниченного объема земной коры на его циклическую нагрузку и разгрузку вследствие гравитационных воздействий лунно-солнечных приливов наземную кору имеет достаточно обширную предысторию и значительный опыт ее решения в различных сейсмических регионах в качестве одного из методов среднесрочного прогноза сильных землетрясений. В последнее время получили развитие теоретические исследования процессов разрушения горных пород при циклических нагружениях и разгрузке участков геосреды, когда параметр $LURR$ принимает значения $Y > 1$ в результате приближения к быстрой фазе образования макроразрывов горных пород под воздействием гравитационных сил лунно-солнечного воздействия на земную кору: $Y = (\Sigma E^m)_+ / \Sigma E^m_-$ [1–4].

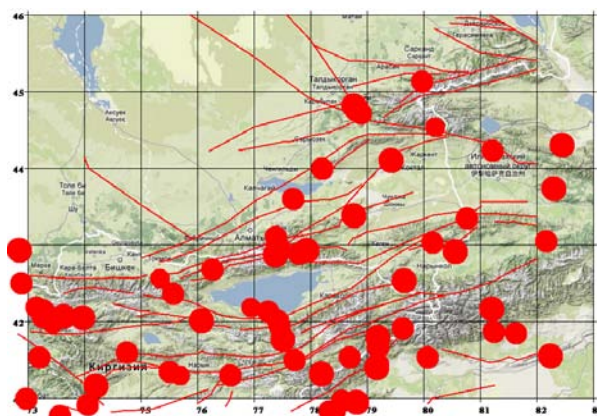


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений с $K \geq 12$ на территории юго-востока Казахстана за 1980–2017 гг.

Методика исследований

С целью повышения эффективности средне- и краткосрочного прогноза необходимо учитывать воздействие внешних факторов на сейсмический режим. Параметр $LURR$, рассчитываемый как отношение условной деформации Беньоффа ($m = 1/2$) во время увеличения приливной нагрузки (E^m_+) к ее значению в период разгрузки (E^m_-), взятой на площадке анализа, широко применяется при

среднесрочном прогнозе [5–8]. Для расчетов параметра $LURR$ в качестве исходных данных применялись каталог основных параметров землетрясений и компоненты теоретического лунно-солнечного прилива. Проведенная сверка программ расчета теоретического прилива показала их хорошую сходимость, мы использовали программу «Tides», разработанную Б.И. Демченко (Институт астрофизики МОН РК), позволяющую рассчитывать часовые значения как компонент (вертикальной, горизонтальной, C -Ю и B -З), так и полного лунно-солнечного прилива в единицах ускорения силы тяжести (мкГал). При построении временных рядов $LURR$ при выделении среднесрочных аномалий использовались сезонные приливные волны с периодами до года и слабые землетрясения с $K = 8$ –9.5, выбранные на площадках размером $1.0^\circ \times 1.0^\circ$. Ретроспективный анализ показал достаточно хорошую прогностическую эффективность метода на землетрясениях с $K > 13$, происшедших за период представительной регистрации сейсмических событий с $K = 8$. На рис. 2 приведены примеры аномалий $LURR$, полученных на площадках в районах эпицентров сильных землетрясений. Аномалии, как правило, проявляются не на всех компонентах приливных вариаций: землетрясения, имеющие всбросо-сдвиговый механизм очага (Байсорунское, 12.11.1990), предварялись аномалиями $LURR$ с использованием полного прилива и его горизонтальной компоненты, землетрясения с преобладанием всбросо-надвигового механизма, предварялись аномалиями $LURR$ на основе вертикальной и C -Ю-компонент (Жаланааш-Тюпское, 24.03.1978).

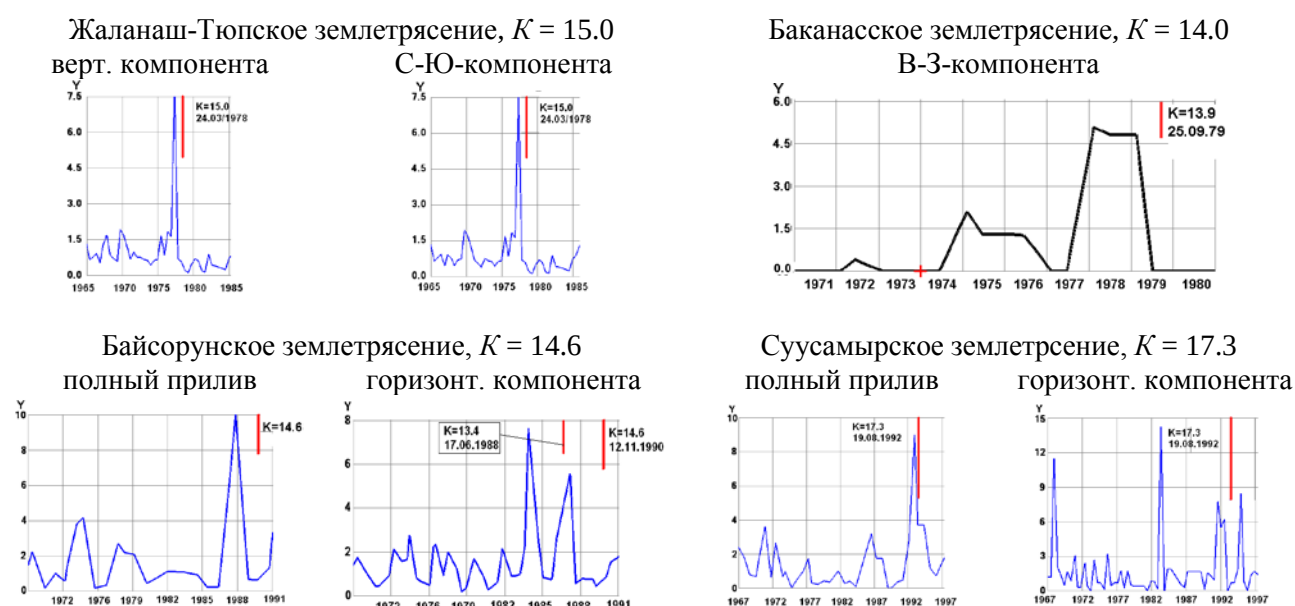


Рис. 2. Среднесрочные аномалии $LURR$ в периоды сильных землетрясений 1978–1992 гг.

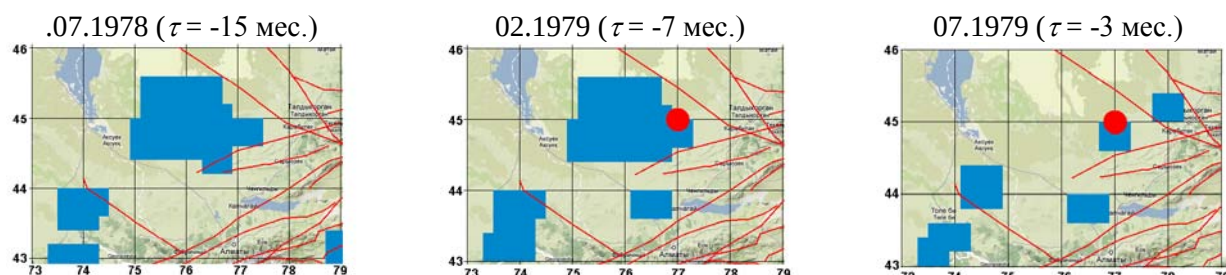
Сильные землетрясения, происшедшие в последние годы на Северном Тянь-Шане и Джунгарии, также предварялись среднесрочными аномалиями $LURR$ (рис. 3). Можно отметить, что при расчете $LURR$ с использованием сезонных приливных волн аномалии, как правило, предваряют моменты возникновения сильных землетрясений на 3–15 месяцев.



Рис. 3. Среднесрочные аномалии $LURR$ в периоды сильных землетрясений 2012–2017 гг.

Составляющая прогноза «место» может быть реализована построением схем пространственного распределения значений Y за выбранные моменты времени и заданным

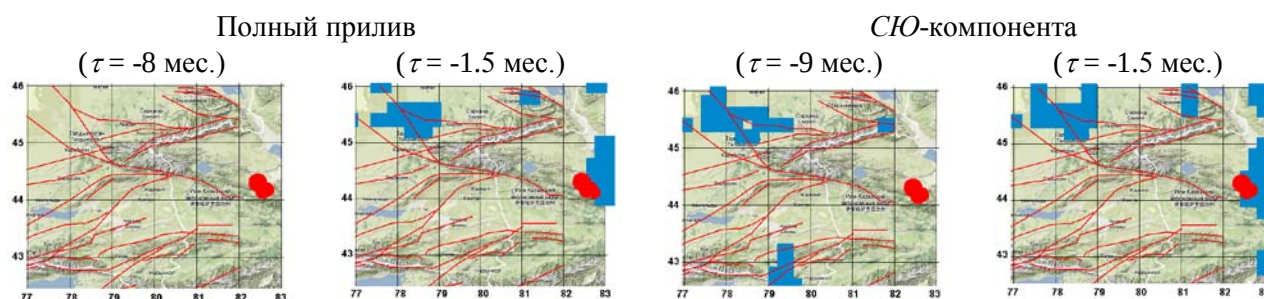
временным сечением для локализации зон аномалий $LURR$ на исследуемой территории для выяснения возможности прогнозирования места сильного сейсмического события. Пространственный анализ распределения параметра $LURR$ с использованием одной из компонент лунно-солнечного прилива производится путем его расчета на каждой площадке выбранного размера $X^\circ \times Y^\circ$ с шагом по широте и долготе 0.2° по выборке из каталога землетрясений в пределах от K_{min} до K_{max} (обычно $7.5 < K < 9.5$). Количество площадок анализа – 1326. На примере Баканасского землетрясения ($K = 13.9$, 25.09.1979) показано развитие пространственных аномалий $LURR$ на моменты экстремумов годовой волны B -3-компоненты лунно-солнечного прилива накануне сейсмического события (рис. 4).



Синяя заливка – площадки с $Y > 5.0$

Рис. 4. Пространственное распределение аномалий $LURR$ накануне Баканасского землетрясения с $K = 14$ (25.09.1979)

Сильное землетрясение на хр. Борохоро (КНР), эпицентр которого находился на периферии района представительной регистрации слабых землетрясений ($K < 7$), произошедшее 08.08.2017 г., отметилось аномальными зонами $LURR$ за 1.5 месяца до события. За 8 месяцев до события по полному приливу аномалия не выделена, а при использовании компоненты прилива C -Ю за 9 месяцев к северо-западу от будущего эпицентра проявилась ложная аномальная зона, которая оставалась до последнего перед землетрясением экстремума приливной волны (рис. 5)

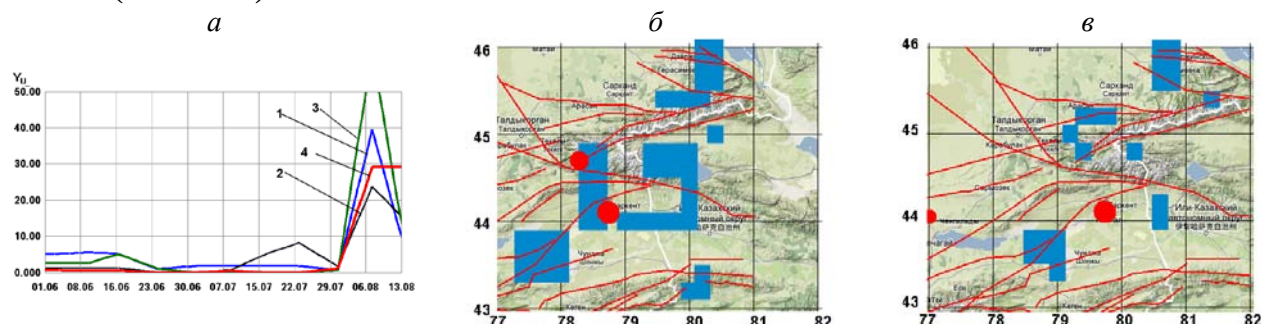


Синяя заливка – площадки со значениями $Y > 5.0$

Рис. 5. Пространственное распределение аномалий $LURR$ накануне землетрясения на хр. Борохоро с $K = 16.5$ (08.08.2017)

С целью выделения краткосрочных предвестников проведены расчеты $LURR$ с использованием короткопериодных вариаций компонент лунно-солнечного прилива с периодами около 14 и 28 суток. Рассчитывались как временные ряды параметров Y_a , Y_g , Y_n , Y_u и Y_v (с использованием полного прилива a и его компонент: горизонтальной g , вертикальной n , восток-запад u и север-юг v соответственно), так и схемы пространственного распределения аномальных зон указанных параметров, рассчитанные по количеству циклов вариаций от 2-х до 12, что соответствует временным окнам размером от 2 до 24 месяцев. Расчеты $LURR$ с использованием B -3-компоненты лунно-солнечного прилива во временном окне размером 2 цикла 28-суточной волны показали появление в июле 2019 г. пространственной аномалии Y в северо-восточной части прогностического полигона с координатами эпицентра аномальной зоны 44.5° сш, 79.5° вд., а также аномалии нормированной активизации L_{eff} и отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s . В связи с появлением аномалий в вариациях магнитного поля, и в изменениях дебита и химического состава подземных вод на комплексной станции Жаркент, расположенной в этой зоне, были проведены расчеты временных рядов параметра Y по площадкам в радиусе 0.5° от эпицентра аномальной зоны,

на которых выявились аномалии Y_u разной амплитуды, приходящиеся на экстремум приливной вариации 7 августа с последующим резким спадом (рис. 6). Пик пространственной аномалии приходится на 23.07.2019 г. (рис. 6, б). Через 2 недели произошло прогнозируемое землетрясение с $K = 11.8$ (14.08.2019)



а: площадки с центрами 44.5° сш, 79.0° вд., 2 – 44.5° сш, 79.5° вд., 3 – 45.0° сш, 79.0° вд., 4 – 45.0° сш, 79.5° вд.

б, в: синяя заливка – площадки $Y > 5.0$

Рис. 6. Временные (а) и пространственные (б, в) аномалии $LURR$ накануне землетрясения с $K = 11.8$ (17.08.2019 г.)

Обсуждение результатов

Полученные на сейсмически активной территории юго-восточного Казахстана результаты исследования влияния приливных воздействий на вариации слабой сейсмичности в периоды подготовки сильных землетрясений позволяют сделать следующие выводы, основным из которых является подтверждение принципиальной возможности применения метода $LURR$ в условиях сейсмичности Тянь-Шаня. Аномалии $LURR$ возникают за 3–15 месяцев до сильного, с $K > 14$, землетрясения при использовании длиннопериодных приливных вариаций. Для землетрясений, эпицентральные зоны которых приурочены к различным тектоническим структурам Северного Тянь-Шаня и Джунгарии, аномалии выделяются при использовании различных составляющих прилива.

Анализ пространственного распределения аномалий $LURR$ на ряде сильных сейсмических событий показал, что аномальные зоны не всегда приурочены к эпицентрам готовящихся землетрясений, а непосредственно перед событием аномалии резко уменьшаются по площади или исчезают.

Выделенные краткосрочные временные и пространственные аномалии $LURR$ при анализе короткопериодных вариаций лунно-солнечного прилива могут быть идентифицированы как краткосрочные предвестники.

Метод $LURR$ представляется перспективным для среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений на территории Юго-Востока Казахстана.

Список литературы

1. Белослюдов О.М. Приливные воздействия на сейсмический режим северного Тянь-Шаня. Межд. научн. конф. Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявления. Бишкек, 2018.
2. Закупин А.С, Каменев П.А. О возможности пространственно-временной локализации повышенной сейсмической опасности в методике среднесрочного прогноза $LURR$ (на примере Новой Зеландии) // Геосистемы переходных зон. 2017. № 3. С. 40–49.
3. Закупин А.С, Жердева О.А. Ретроспективная оценка применимости методов среднесрочного прогнозирования землетрясений для северного Сахалина // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 1. С. 18–25.
4. The Load-Unload Response Ratio ($LURR$) Theory and Its Application to Earthquake Prediction // Journal of Earthquake Prediction Research 3 (1994) P. 325–333. © 1994 by State Seismological Bureau, Beijing, China, © 1994 by Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
5. Yin X.C. et al. A new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio ($LURR$) Theory, Pure Appl. Geophys. 1995. V. 145, № 3/4. P. 701–715.
6. Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. Development of a new approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio ($LURR$) Theory, Pure Appl. Geophys. 2001. V. 157, № 11/12. P. 2365–2383.
7. Iang-Chu Yin, Huai-Zhong Yu, Vuctor Kuksrsko at al. Load-Unload Response Ratio ($LURR$), Accelerating Moment/Energy Release (AM/ER) and State Vector Saltation as Precursors to Failure of Rock Specimens. Pure appl. geophys. 161 (2004) P. 2405–2416
8. Nilupar Mamattursun. Tempo-special Variation of $LURR$ before Strong Earthquakes in Western Segment of Northern Tian Shan. Report of the 9th Kazakhstan-Chinese Symp. Almaty, 2017.