

**RETROSPECTIVE MEDIUM-TERM FORECAST OF A CATASTROPHIC EARTHQUAKE
IN TURKEY IN 2023 (02.06.2023, $M_w=7.7$) USING THE LURR METHOD**A.S. Zakupin ¹✉, N.A. Sycheva ²

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT. Variations of the LURR (load-unload response ratio) earthquake medium-term forecast parameter in combination with changes in seismotectonic deformation modes (STD) for the East Anatolian fault region, where catastrophic earthquakes occurred in February 2023 (06.02.2023, $M_w=7.8$, 06.02.2023, $M_w=7.6$) are considered. The depth of the earthquake catalog for the LURR method calculations was equal to 23 years, and estimates of STD modes were possible received since 1976. Calculations have shown satisfactory results in detecting LURR anomalies before strong earthquakes. Almost half of the anomalies occurred in the one and a half year period before the doublet, and are unambiguously associated as precursors. The precursors were recorded by two series of LURR parameter anomalies in 2021 and 2022, and the calculation areas in which they were recorded compactly cover the East Anatolian fault, including the epicenters of the earthquakes on February 6, 2023. The results of calculations using the LURR method were compared with the reconstruction data using the STD method. As a result, it was possible to build the dynamics of the earthquake preparation process in its final part – from the appearance of the LURR anomaly to the earthquake. At the same time, the period before the appearance of anomalies (since the 1976) was also taken into account. It is shown that during the period of abnormal LURR behavior (the forecast period), the most significant changes in the geodynamic regime were observed, as well as a sharp increase in total seismic activity.

KEYWORDS: earthquake; LURR; forecast; seismotectonic deformation; Turkey

FUNDING: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences.



EDN: IXMJFE

RESEARCH ARTICLE**Correspondence:** Alexander S. Zakupin, dikii79@mail.ru

Received: January 16, 2024

Revised: April 4, 2024

Accepted: April 15, 2024

FOR CITATION: Zakupin A.S., Sycheva N.A., 2024. Retrospective Medium-Term Forecast of a Catastrophic Earthquake in Turkey in 2023 (02.06.2023, $M_w=7.7$) Using the LURR Method. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (3), 0762. doi:10.5800/GT-2024-15-3-0762

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ В 2023 ГОДУ (06.02.2023, $M_w=7.7$) МЕТОДОМ LURR

А.С. Закупин¹, Н.А. Сычева²

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены вариации параметра среднесрочного прогноза землетрясений LURR (load-unload response ratio, коэффициент отклика на нагрузку – разгрузку) в сочетании с изменениями режимов сеймотектонических деформаций (СТД) для области Восточно-Анатолийского разлома (ВАРЗ), где в феврале 2023 г. произошли катастрофические землетрясения (06.02.2003 г., $M_w=7.8$, 06.02.2003 г., $M_w=7.6$). Глубина каталога землетрясений для расчетов по методу LURR была равна 23 годам, а оценки режимов СТД удалось получить с 1976 г. Расчеты показали удовлетворительные результаты по выявлению аномалий LURR перед сильными землетрясениями. Около половины аномалий произошли в полуторагодовой период до дублета и однозначно ассоциируются как предвестники. Предвестники были зарегистрированы двумя сериями аномалий параметра LURR в 2021 и 2022 гг., а области расчета, в которых они были зарегистрированы, компактно покрывают ВАРЗ, включая эпицентры землетрясений 6 февраля 2023 г. Результаты расчетов по методу LURR сопоставлялись с данными реконструкции по методу СТД. В результате удалось выстроить динамику процесса подготовки землетрясения в его финальной части – от появления аномалии LURR до землетрясения. При этом также учитывался период до появления аномалий (с 1976 г.). Показано, что в период аномального поведения LURR (прогнозный период) наблюдались наиболее значимые изменения геодинамического режима, равно как и резкий рост общей сейсмической активности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение; LURR; прогноз; сеймотектонические деформации; Турция

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод прогнозирования землетрясений LURR [Yin et al., 1995, 2006] интересен тем, что распределение сейсмических событий в пространстве и времени изучается в контексте развития процесса разрушения непосредственно в очаге землетрясения. В аспекте механики разрушения процесс подготовки к землетрясению – это процесс локализации деформаций и повреждений среды в очаговой области. Как и в сплошных средах, во фрагментированной геосреде процесс разрушения проходит ряд стадий. LURR был предложен в качестве меры этого процесса. LURR обычно определяется как отношение высвобождения деформации Беньофа во время циклов нагрузки по сравнению с циклами разгрузки на оптимально ориентированных разломах, вызванных земными приливами. Высокие значения LURR (больше единицы) указывают на то, что регион подготовлен к крупному землетрясению. С момента появления первых публикаций подход активно развивался и появилось много работ различной направленности. Кроме классических работ по ретроспективному прогнозу землетрясений [Feng et al., 2012], были работы по прогнозу оползневой опасности [Zhang et al., 2006], а также экспериментальные работы на образцах горных пород для изучения их физико-механических свойств [Zhao, He, 2017; Zhu et al., 2016; Gong et al., 2019]. Одно из последних исследований посвящено комплексированию отклика LURR в

деформационном и геоэлектрическом полях [Yu et al., 2022]. Перечисленные выше работы содержат интересные ретроспективные прогнозы, однако существуют определенные методологические ограничения, которые препятствуют реализации прогнозов в режиме реального времени.

Интересные результаты анализа сейсмичности с помощью метода LURR были получены для Сахалина [Zakupin, Boginskaya, 2021; Zakupin et al., 2018, 2020]. Работа началась в 2015 г. с ряда ретроспективных прогнозов известных сильных землетрясений на Сахалине (Нефтегорское, $M=7.2$, и Невельское, $M=6.2$), и уже в 2016 г. был представлен первый прогноз в режиме реального времени. Второй прогноз был сделан менее чем через год. Прогнозы рассматривались на заседаниях Сахалинского отделения Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (СФ РЭС, протокол № 3 от 11.05.2016 г., протокол № 2 от 16.03.2017 г.). Оба прогноза были признаны полностью реализованными землетрясениями Оноп (14.08.2016 г., $M=5.8$) и Крильон (23.03.2017 г., $M=5$) [Zakupin et al., 2018, 2020]. К настоящему времени авторами проведены многочисленные исследования сейсмичности методом LURR на Сахалине. Основная задача этой работы заключается в том, чтобы применить полученный опыт за его (Сахалина) пределами. Представляет интерес изучение сейсмичности Восточно-Анатолийского разлома, который проходит по территории Турции и Сирии.

Эта сейсмически активная зона в 2023 г. для сейсмологов стала темой № 1 в мире. 6 февраля 2023 г. Юго-Восточную Турцию (в Кахраманмараш/Пазарчике) и Северную Сирию потрясло разрушительное двойное землетрясение, ($M_w=7.8$ и $M_w=7.6$, по данным Геологической службы США (USGS)), вызвавшее масштабные разрушения и унесшее 50 тыс. жизней [Zilio, Ampuero, 2023]. В 2023 г. вышел ряд публикаций, посвященных этим событиям. Первое землетрясение ($M_w=7.8$) произошло вдоль Восточно-Анатолийского разлома (ВАРЗ) на 37.225° с.ш., 37.021° в.д., а второе ($M_w=7.6$) – на Чардакском разломе (Cardak fault) на 38.024° с.ш., 37.203° в.д., этот разлом связан с сегментом Еркенек ВАРЗ (рис. 1, а). Оба главных толчка произошли на небольшой глубине (10.0–14.5 км), что вызвало интенсивное движение грунта и привело к катастрофическим региональным воздействиям [USGS..., 2023; Melgar et al., 2023; Okuwaki et al., 2023; Mai et al., 2023; Chen et al., 2023; Rebetsky, 2023; Tikhotsky et al., 2023]. Для первого землетрясения разрыв протянулся примерно на 300 км с поверхностными смещениями до 5 м. Второе – с магнитудой 7.6 – произошло на двух ответвлениях Восточно-Анатолийской зоны разломов – Сюрдю и Чардак. Хотя второе событие привело к более короткому разрыву около 160 км, оно сопровождалось

большими смещениями суши – до 7–8 м. Временные функции источника обоих событий, описывающие скорость высвобождения энергии во времени после начала землетрясения, предоставлены USGS и показаны на рис. 1, б [Zilio, Ampuero, 2023]. Результаты анализа перемещений афтершоков первых 11 дней и моделей разрывов для обоих событий, полученных на основе совместной кинематической инверсии HR-GNSS и данных о сильных движениях с учетом множественных разломов и трехмерной геометрии разрыва, представлены в работе [Melgar et al., 2023]. Согласно полученным моделям максимальная скорость разрыва оценивается в 3.2 км/с для события $M_w=7.8$ (рис. 1, а). Для землетрясения с $M_w=7.6$ сверхсдвиговой разрыв имел скорость 4.8 км/с в западном направлении, а субсдвиговой разрыв – скорость 2.8 км/с в восточном направлении. По данным [Melgar et al., 2023], максимальная подвижка для обоих событий достигала ~8 и ~6 м соответственно.

Согласно работе [Abdelmeguid et al., 2023], землетрясение в Кахраманмараш/Пазарчике с $M_w=7.8$ было по многим параметрам более масштабным и разрушительным, чем ожидалось на основе исторических данных за последние несколько столетий [Acarel et al., 2019]. Предполагаемая магнитуда крупнейшего

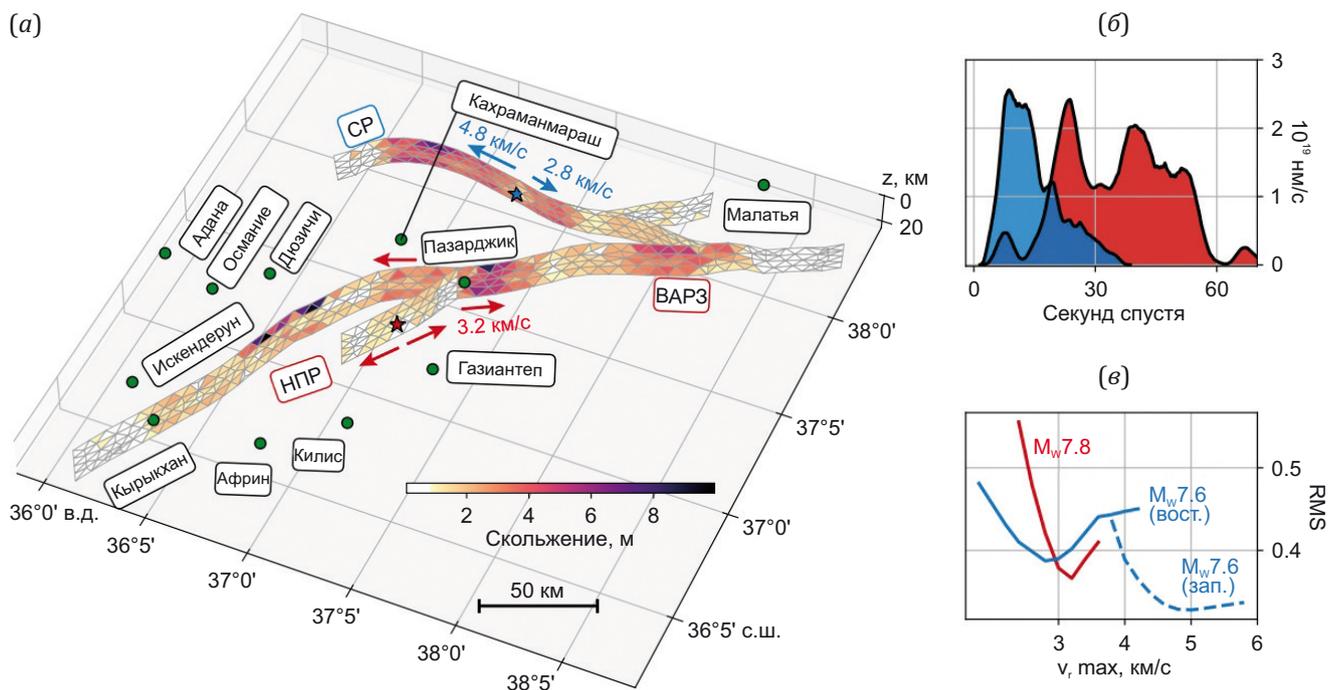


Рис. 1. Перспективный вид предполагаемой геометрии инверсии для обоих событий (по [Melgar et al., 2023]). M_w 7.8 разрывается на ВАРЗ и Нурдагы-Пазарджикском разломе (НПР), M_w 7.6 – на разломе Сюрдю (СР). (а) – окончательные наиболее подходящие распределения скольжения. Зелеными кружками отмечены населенные пункты в регионе. (б) – функции времени источника для обоих разрывов. (в) – среднеквадратичное отклонение (RMS) в зависимости от максимальной скорости разрыва v_r max, допустимой при инверсии для обоих событий.

Fig. 1. Perspective view of the estimated inversion geometry for both events (after [Melgar et al., 2023]). The M_w 7.8 ruptures on the East Anatolian fault (BAPZ) and Nurdağı-Pazarçık fault (НПР), the M_w 7.6 on the Sürgü fault (СР). (а) – shown are the final best fitting slip distributions. Labeled in green circles are population centers in the region. (б) – source time functions for both ruptures. (в) – root mean square (RMS) misfit as a function of maximum rupture speed v_r max, allowed in the inversion for both events.

землетрясения, произошедшего на ВАРЗ за последние несколько сотен лет, составляет 7.2, что, как полагают, является либо землетрясением в Палу (Элязыг, город и район на востоке Турции в Восточной Анатолии) 1789 г., либо землетрясением в Аманосе 1872 г. [Ambraseys, 1989; Tan et al., 2008]. Эта оценка меньше, чем магнитуда землетрясения Кахраманмараш/Пазарчик. Более того, каждое из этих исторических событий привело к разрыву сегмента ВАРЗ, но ни одно из них не распространилось на несколько сегментов, как недавнее событие [Abdelmeguid et al., 2023].

Согласно [Ambraseys, 1989], последнее землетрясение на участке ВАРЗ, связанном с землетрясениями 6 февраля 2023 г., произошло в 1513 г. и, как указано в работе [Aktug et al., 2016], имело дефицит подвижки 5.2 м. В работе [Aktug et al., 2016] было также отмечено, что даже если предположить, что землетрясение 1893 г. ($M=7.1$) произошло в пределах сегмента Чэлихан-Гольбаши, то этот участок все равно имеет очень высокий сейсмический потенциал для события такой силы, как $M_w=7.7$. По сути в работе [Aktug et al., 2016] был сделан прогноз места землетрясения и его силы. Исходя из вышесказанного, в данной зоне предпосылки для успешной реализации метода LURR присутствуют. Проверка метода LURR в ретроспективном исследовании может явиться хорошим дополнением к ранее полученным другими исследователями результатам. Также в работе предлагается рассмотреть динамику напряженно-деформированного состояния среды на этапах подготовки очага (возникновение и развитие аномального состояния среды по методу LURR) с помощью метода СТД [Yunga, 1990].

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ТЕКТОНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Для оценки параметра LURR был использован каталог землетрясений, полученный с Боун Коери регионального центра мониторинга землетрясений и цунами [USGS..., 2023]. Каталог содержит данные о 375950 сейсмических событиях (20.09.1900 г. – 31.07.2023 г.). Энергетическая характеристика землетрясений в каталоге представлена следующими магнитудами: магнитудой продолжительности землетрясения MD (104379 событий); локальной ML (262453 события); моментной MW (12794 событий); по поверхностным волнам MS (15196 событий) и по объемным волнам mb (1866 событий). В каталоге также отмечена магнитуда xM как наибольшее значение магнитуды в заданных значениях магнитуд. Можно считать, что более 70 % землетрясений в этой колонке представлено локальной магнитудой ML. В данной работе используется значение xM магнитуды, что дает возможность использовать максимум землетрясений из каталога. Для расчетов по методу LURR из данного каталога за период с 2000 по 2023 г. для исследуемой территории, 34–41° с.ш., 34–41° в.д (52841 событие), были сделаны выборки землетрясений с магнитудой от 3.3 до 5.0 в 99 круговых областях радиусом один градус вдоль Восточно-Ана-

толийской разломной зоны. Отметим, что в этот период регистрационные возможности сети станций вышли на хорошие показатели качества регистрации в отношении землетрясений в данном диапазоне магнитуд [USGS..., 2023]. Среднее количество землетрясений в каждой рабочей выборке составляло несколько сотен землетрясений за 23-летний расчетный период.

Для расчета сейсмотектонических деформаций использовался каталог фокальных механизмов, включающий данные из трех источников: CMT [Global CMT Catalog, 2023], GEOFON (<https://geofon.gfz-potsdam.de>) и KOERI [B.U. KOERI-RTMC..., 2023]. Первый источник содержит тензоры сейсмического момента для 554 землетрясений, произошедших с 1976 по 2023 г., второй – параметры нодальных плоскостей 357 землетрясений, которые произошли с 2011 по 2023 г., и третий – параметры нодальных плоскостей 357 землетрясений, которые произошли с 2015 по 2023 г. Для обнаружения и удаления дублирующих событий из вышеописанных источников была использована авторская программа.

В этой работе принципиально описание объекта исследования и результаты расчетов и отдельного раздела по методикам не предусмотрено, прежде всего потому, что в ранних многочисленных работах авторов этому всегда уделялось достаточно внимания. Так, метод LURR описан в классических англоязычных версиях [Yin et al., 1995, 2006] и транслирован в русскоязычных статьях [Zakupin, Boginskaya, 2021; Zakupin et al., 2018, 2020]. Можно отметить, что используется классическая формула для расчета LURR с показателем степени $m=1/2$, что определяет расчетный параметр как корень из сейсмической энергии (деформация Беньюффа). Также следует пояснить, что дополнительные действия с каталогом, кроме выборки по диапазону магнитуд, не производились. Смысловая часть этой выборки заменяет, по данным китайских коллег, декластеризацию, а точнее уменьшает влияние афтершоков на результат. Для обработки данных методом LURR используется программный комплекс Seis-ASZ, разработанный в ИМГиГ ДВО РАН [Zakupin, 2016].

В основе исследования напряженно-деформированного состояния очаговых областей лежит метод расчета сейсмотектонических деформаций с использованием данных о фокальных механизмах очагов землетрясений. Методика расчета СТД подробно описана в монографии [Sycheva et al., 2020]. Однако стоит отметить, что при проведении расчетов направленности сейсмотектонической деформации посредством осреднения исходных данных геоструктурная область подразделяется на элементарные подобласти с некоторым радиусом, центры которых размещаются в узлах (узловые точки) специально выбранной сетки. Выбор узловых точек осуществлен по сетке с шагом 0.5° (~50 км), радиус рассматриваемой области составляет $R=0.5^\circ$ (~50 км) и глубина исследуемого слоя – 40 км. Построение карт СТД выполнено на основе классификации режимов СТД [Yunga, 1997].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование методом LURR проводилось в режиме сканирования на площади, достаточной для охвата активационного объема, который соответствует уровню изучаемого землетрясения. Для этого область, где расположены эпицентры землетрясений, была окружена 99 областями расчета в пределах зоны с координатами: 35–41° с.ш., 34–41° в.д. (карта на рис. 2). Расчетные области радиусом один градус размещены произвольно вне зависимости от эпицентров землетрясений.

Также на рис. 2 показаны 11 сильнейших землетрясений с $M \geq 6$ в окрестности ближайших тектонических структур начиная с 1999 г. Основная часть этих событий произошла в прибрежных юго-западных областях Турции, вдали от ВАРЗ. В восточной части Турции произошло три землетрясения – № 3 (01.05.2003 г., $M=6.4$), № 5 (23.10.2011 г., $M=7.2$) и № 7 (24.01.2020 г., $M=6.7$) из таблицы, представленной на рис. 2.

Кроме 99 областей расчета, входящих в сетку сканирования, авторы традиционно проводят расчет в таких же кругах, но привязанных к эпицентрам проверяемых землетрясений. В них за 2000–2023 гг. всего было зарегистрировано 2113 и 2929 землетрясений

соответственно. Из них в диапазоне магнитуд рабочей выборки ($M=3.3-5.0$) 1162 и 1704 соответственно. Это удовлетворительные данные для проведения расчетов, однако в сетке наших расчетных областей (в режиме сканирования без привязки к эпицентрам землетрясений) не везде ликвидные данные (недостаточное количество землетрясений в выборке). В Прил. 1, табл. 1.1, красным цветом отмечены области расчета, в которых количество землетрясений в рабочих выборках за 23 года меньше 200 (в среднем менее 10 в год). Эти области также рассчитывались, и характер изменения параметра LURR (многочисленные короткие импульсы, длительные провалы в ноль) показывал, что данные для расчета непригодны. В основном анализе эти области не учитывались, и на карте (рис. 2) они отмечены синим цветом. Всего для расчета оказалось доступно 56 из 99 областей. Предварительный анализ данных показал, что параметр LURR отражает высокий уровень фоновых изменений (относительно сильных колебаний) и порог значений для выделения аномалий, который ранее авторы использовали в своих работах (равен значению 3), в этом случае не применим. Необходимость в значительном увеличении порога заставила авторов перейти к использованию

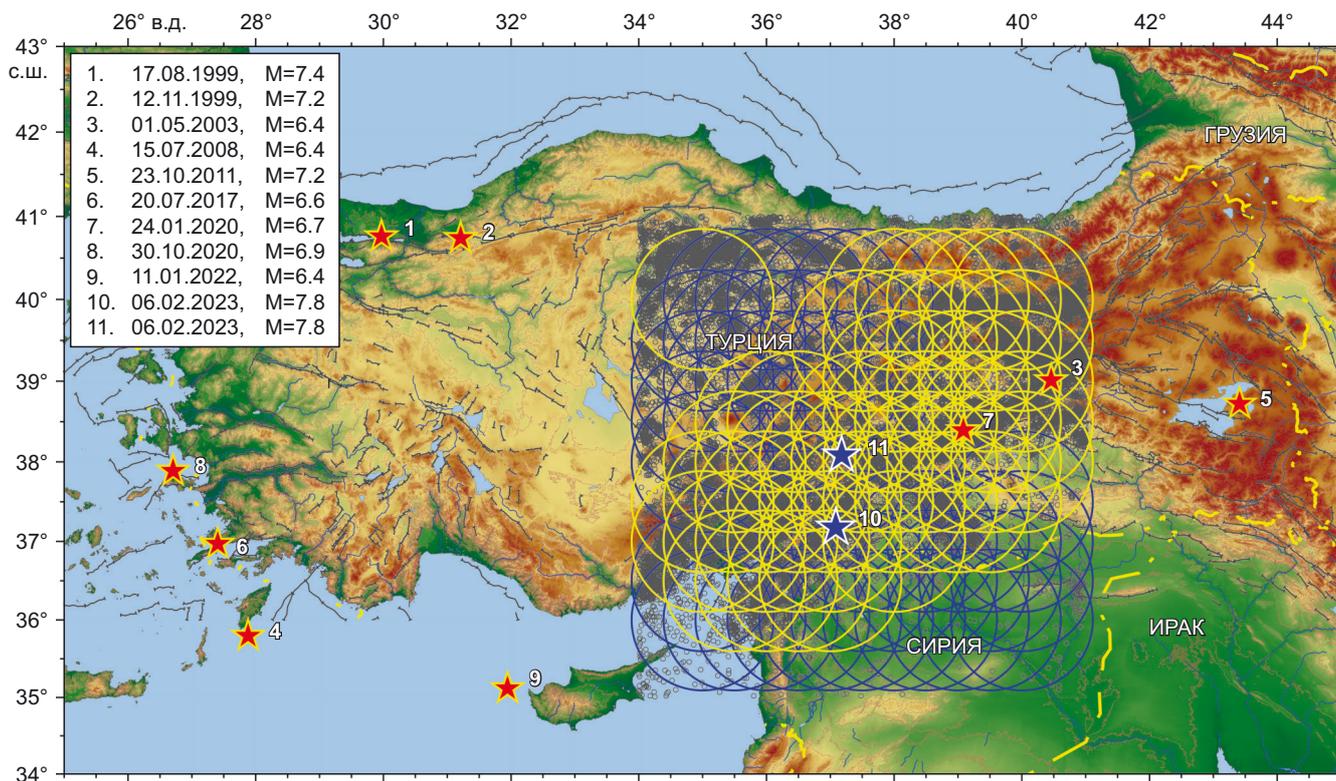


Рис. 2. Карта исследуемой области.

Желтыми кружками показаны расчетные области, в которых возможно провести расчет параметра LURR. Звездочками показаны 11 сильнейших землетрясений в период с 1999 по 2023 г. (на врезке указаны их параметры). Серым цветом отмечены эпицентры землетрясений, расположенные в рассматриваемой области и анализируемых в работе.

Fig. 2. Map of the study area.

Yellow circles show the computational areas in which it is possible to calculate the LURR parameter. The asterisks indicate the eleven strongest earthquakes between 1999 and 2023 (the insert shows their parameters). The epicenters of earthquakes located in the area under consideration and analyzed in the work are marked in gray.

нескольких вариантов. Так, было выбрано три порога (5.0, 7.5, 10.0), из которых после предварительной статистической обработки для глубокого анализа должен остаться только один. Прежде чем анализировать результаты расчетов, полученных в 56 областях, авторы построили графики изменения параметра LURR в таких же круговых областях в эпицентрах обоих землетрясений февраля 2023 г. На рис. 3 показаны графики изменения параметра LURR. Стоит учитывать, что в классических работах [Yin et al., 2006] среднесрочные прогнозы методом LURR не имеют характерных границ для времени ожидания события с момента фиксации признака (аномалии LURR).

В работе [Zakupin, Boginskaya, 2021] установлено, что для Сахалина эффективны прогнозы с периодом ожидания до двух лет. Применим эту границу и в данном случае, получив дату, начиная с которой есть смысл аномалии привязывать к рассматриваемым землетрясениям – это февраль 2021 г. (условно с 2021 г.). В эпицентральной области первого землетрясения, в июле 2021 г., наблюдается аномалия с превышением всех пороговых значений (максимум параметра LURR равен 27, рис. 3, а). В эпицентральной области второго землетрясения аномалии наблюдаются в апреле 2001 г. и в июле 2012 (рис. 3, б). При этом нужно отметить, что порог, равный 10, на первом графике превышает только аномалия 2021 г. (без учета короткого импульса в 2014 г.), а на втором таких аномалий нет совсем. Результаты, показанные на этих графиках, свидетельствуют о том, что параметр LURR в эпицентральных зонах дал предвестник для первого землетрясения, а вот для второго не дал ничего, при этом эпицентры расположены достаточно близко друг к другу. В этом смысле какие-то однозначные выводы сделать весьма сложно и помочь разобраться могут расчеты в плотной сетке (т.е. рассмотрение 99 расчетных областей, Прил. 1, табл. 1.1), о которых пойдет речь ниже. Рассмотрим результаты в 56 областях, доступных для расче-

та. Графики изменения параметра LURR представлены в Прил. 2. При рассмотрении графиков возникает впечатление, что в 2021–2022 гг. аномалии наблюдаются чаще, чем в другие периоды. Проверим, так ли это. В Прил. 3, табл. 3.1 показаны характеристики расчетных областей и даты отсечки (время первого превышения порога) для аномалий, выявленных по трем выбранным порогам. Подсчитаем общее количество аномалий и отдельно те, которые произошли в интересующий нас период. В итоге аномалий в 56 расчетных областях (расчетный период с 2000 г. по февраль 2023 г.):

- по порогу 5 – 96 аномалий (из них в период с 2021 по 2022 г. – 23, или около 25 % от всех аномалий);
- по порогу 7.5 – 53 аномалии (из них в период с 2021 по 2022 г. – 20, или около 37 % от всех аномалий);
- по порогу 10 – 37 аномалий (из них в период с 2021 по 2022 г. – 16, или около 43 % от всех аномалий).

Наиболее благоприятными для анализа являются аномалии, которые сохраняют присутствие при максимальном пороге, ведь в этом случае в рассматриваемый период (перед землетрясениями 2023 г.) зарегистрирована почти половина всех аномалий LURR (43 % при пороге 10).

Согласно Прил. 3, табл. 3.2 в 16 расчетных областях, где аномалии были отмечены в 2021–2022 гг., они формируют две группы. Шесть аномалий произошли с марта по октябрь 2021 г. (основная масса пришлась на июль – август). Другая группа аномалий формируется в десяти областях с мая по ноябрь 2022 г. На рис. 4, а, эти области расчета обозначены разным цветом. Области 2021 г. легли очень «кучно» на Восточно-Анатолийский разлом, что хорошо для оценки позиции ожидаемого события. В 2022 г. аномалии появились в областях севернее и западнее разлома. При этом зона прогноза расширилась. Рассмотрим также другие аномалии, выделенные по выбранному порогу (Прил. 3, табл. 3.2).

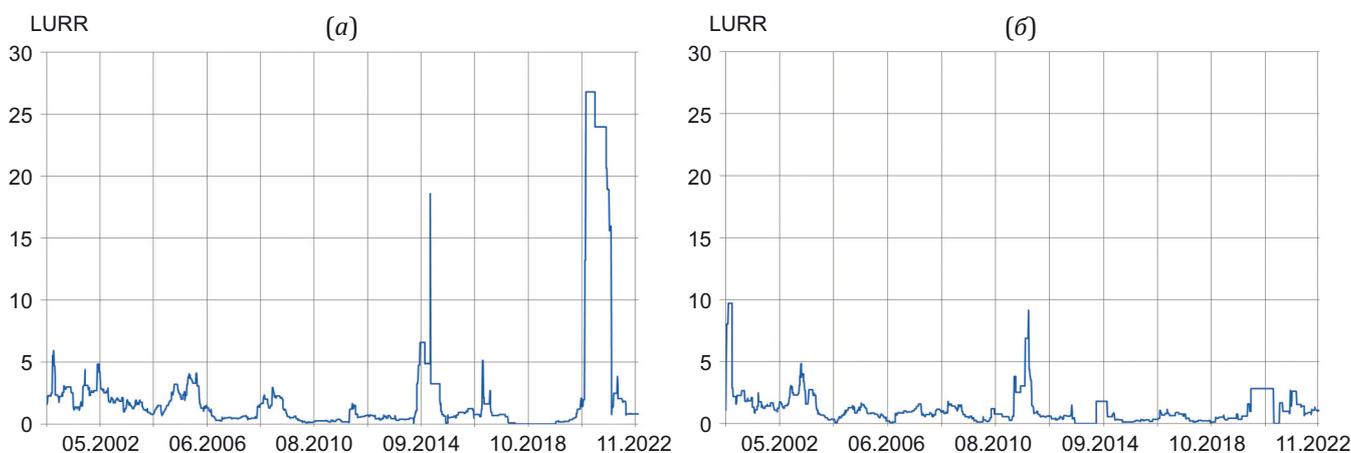


Рис. 3. Изменение параметра LURR в расчетных областях с центрами в эпицентрах землетрясений 6 февраля 2023 г.: (а) – $M_w=7.8$, координаты 37.18° с.ш. и 37.08° в.д.; (б) – $M_w=7.6$, координаты 38.08° с.ш. и 37.18° в.д.

Fig. 3. Change in the LURR parameter in the calculation areas with centers at the epicenters of the earthquakes on February 6, 2023: (а) – $M_w=7.8$, coordinates 37.18° N and 37.08° E; (б) – $M_w=7.6$, coordinates 38.08° N and 37.18° E.

Всего таких аномалий осталось 21. При этом из них две аномалии в апреле и июне 2010 г., три в 2000–2002 гг., пять аномалий с 03.2018 г. по 10.2018 г. – это возможные прекурсоры всех трех землетрясений, что находятся восточнее наших расчетных зон (10.2011 – № 5; 05.2003 – № 3; 01.2020 – № 7, рис. 4, б). Возможные хотя бы потому, что эпицентры этих трех землетрясений находятся на удалении от расчетных областей, где фиксировались аномалии. Расстояния внушительные, да и рядом с землетрясениями № 7 и № 3 находятся расчетные области, и в них эти аномалии отсутствуют.

Также остаются девять аномалий с 05.2012 г. по 08.2015 г. (причем в 2012 г. их пять), и по одной в 2020 и в 2004 гг. Подходящих прогнозных целей для этих аномалий не видится, поэтому решение отнести их к ложным аномалиям целесообразно. Если признать ложными и аномалии на рис. 4, б, (а это было бы логично), то ложных среди всех аномалий будет 57 %. В этом случае по сильным землетрясениям имеются также и две пропущенные цели (землетрясения № 3 и № 7) из землетрясений с $M > 6$ в пределах территории, на которой выполнялись расчеты. Но на статистику можно посмотреть и с другой стороны. Так, за два года, предшествующих катастрофическим землетрясениям 2023 г. из общего периода расчета в 23 года, а это 10 % всего расчетного времени, было зарегистрировано 43 % аномалий. И это говорит о том, что в целом

по методу LURR здесь получены достойные результаты, но можно ли их лучше понять с помощью оценок методом СТД? Ведь по факту напряженное состояние метод LURR показывает по косвенным признакам, а сейсмотектонические оценки – это реальные фактические данные.

Каталог фокальных механизмов, на основе которого рассчитывается СТД, включает в себя данные с 1976 по 2023 г. (48 лет). Для мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния во времени сейсмотектонические деформации рассчитаны для нескольких временных периодов. Первый временной период с 1976 по 1999 г. составляет 24 года. Последующие 24 года разбиты на следующие интервалы: 2000–2005 гг. – 6 лет; 2006–2010 гг. – 5 лет; 2011–2015 гг. – 5 лет; 2016–2019 гг. – 4 года; 2020 – январь 2023 гг. – 3 года. Для каждого из исследуемых периодов построены карты фокальных механизмов и СТД (рис. 5, 6). На картах звездочками показаны эпицентры землетрясений, произошедших 6 февраля 2023 г. с $M_w=7.8$ и $M_w=7.6$. В табл. 1 представлено количество землетрясений, произошедших на территории исследования, диапазон изменения магнитуд и количество событий с $M \geq 5$ для каждого из рассматриваемых периодов, а также указано минимальное и максимальное число событий, участвовавших в расчете СТД, и изменение усредненного направления оси укорочения для рассматриваемых временных периодов.

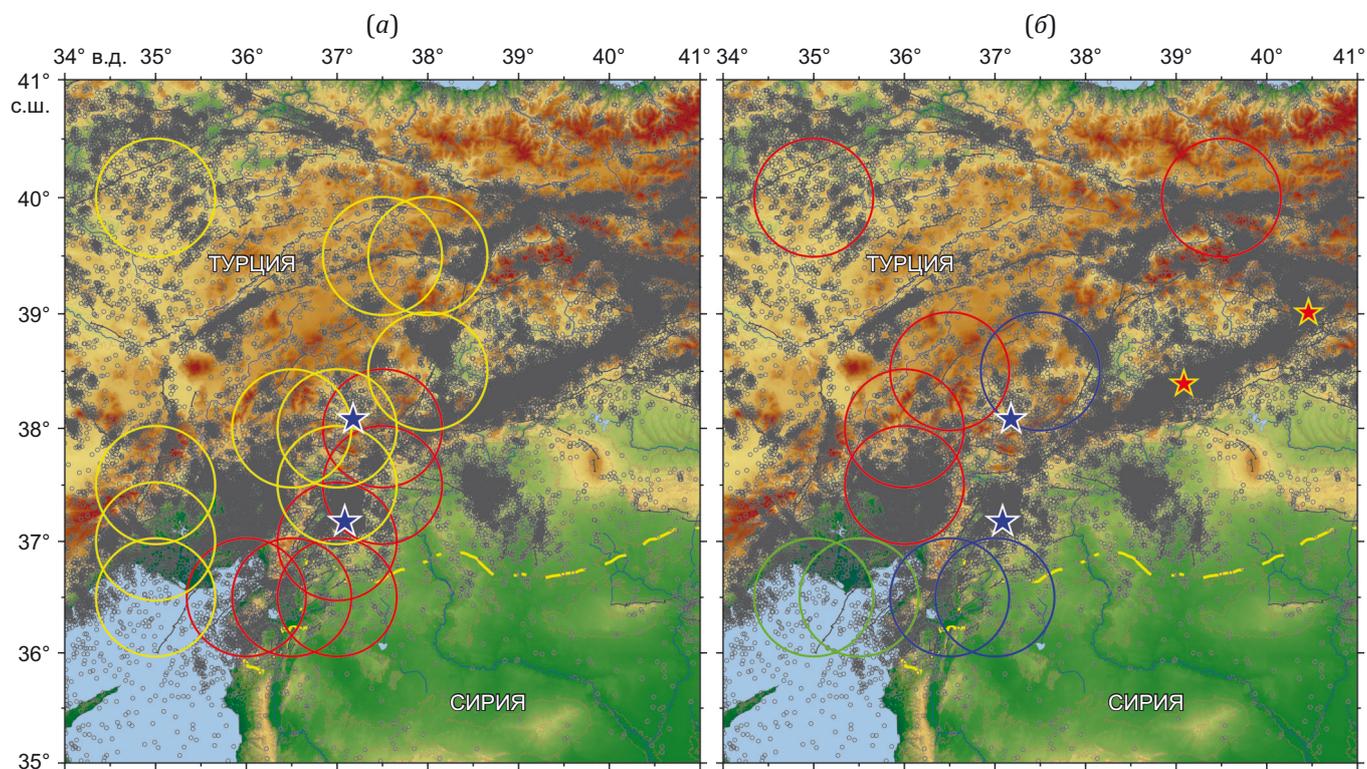


Рис. 4. Карта с указанием расчетных областей, в которых обнаружены аномалии: (а) – в 2021 (красный цвет) и 2022 гг. (желтый); (б) – в 2000–2002 гг. (синий), в 2010 г. (зеленый) и 2018 г. (красный).

Fig. 4. Map indicating the estimated areas in which anomalies were detected: (a) – in 2021 (red color) and 2022 (yellow); (b) – in 2000–2002 (blue), in 2010 (green) and 2018 (red).

Таблица 1. Некоторые количественные характеристики фокальных механизмов очагов землетрясений Восточной Анатолии (35–41° с.ш., 34–41° в.д.) для разных временных периодов

Table 1. Some quantitative characteristics of focal mechanisms of earthquake foci in Eastern Anatolia (34–41° E – 35–41° N) for different time periods

Период, гг.	M_w	Количество				Paz, °
		Всего	$M_w \geq 5$	$M_w \geq 5$ /год	СТД, ЗЛТ/ячейка	
1976–1999	5.1–6.6	22	22	0.9	2–6	1
2000–2005	4.8–6.3	14	12	2.0	2–8	355
2006–2010	4.8–6.1	17	12	2.4	2–8	18
2011–2015	3.6–5.6	21	7	1.4	2–6	1
2016–2019	4.0–5.6	19	4	1	2–11	5
2020–2022	4.2–6.8	33	15	5	2–14	5

Примечание. СТД, ЗЛТ/ячейка – количественный диапазон событий в ячейке, участвовавших в расчете СТД. Paz – усредненный азимут оси укорочения.

Note. СТД, ЗЛТ/cell – quantitative range of events in the cell involved in the calculation of STD. Paz – averaged azimuth of the shortening axis.

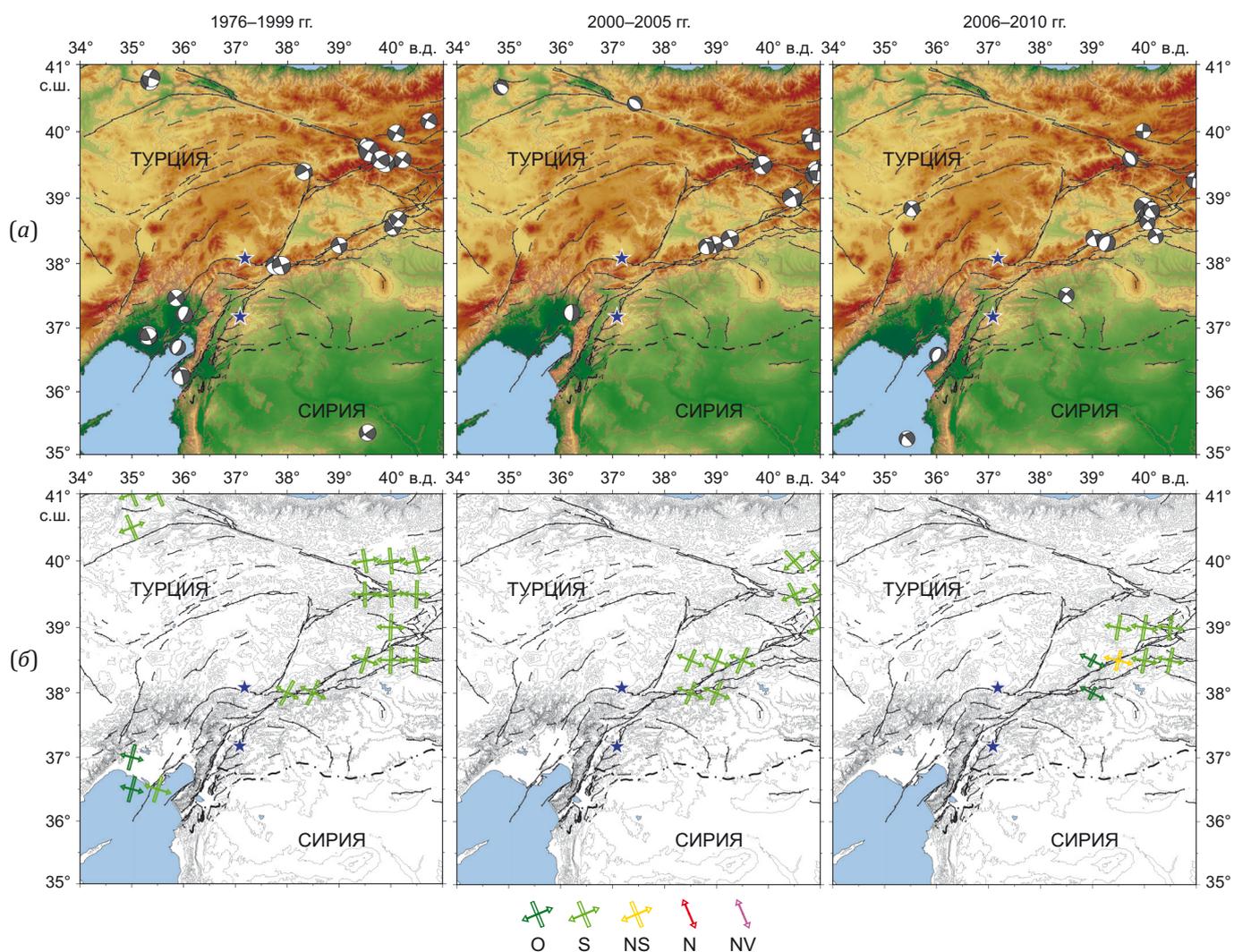


Рис. 5. Фокальные механизмы землетрясений (а) и карты СТД (б) для временных периодов: 1976–1999 гг.; 2000–2005 гг.; 2006–2010 гг. Классификация режимов СТД: О – косой сдвиг, S – горизонтальный сдвиг, NS – транстенсия, N – растяжение, NV – переходный режим от вертикального сдвига к растяжению.

Fig. 5. Focal mechanisms of earthquakes (a) and STD maps (b) for time periods: 1976–1999; 2000–2005; 2006–2010. The classification of STD modes: O – oblique, S – strike-slip fault, NS – transtension, N – normal tension, NV – undertensional.

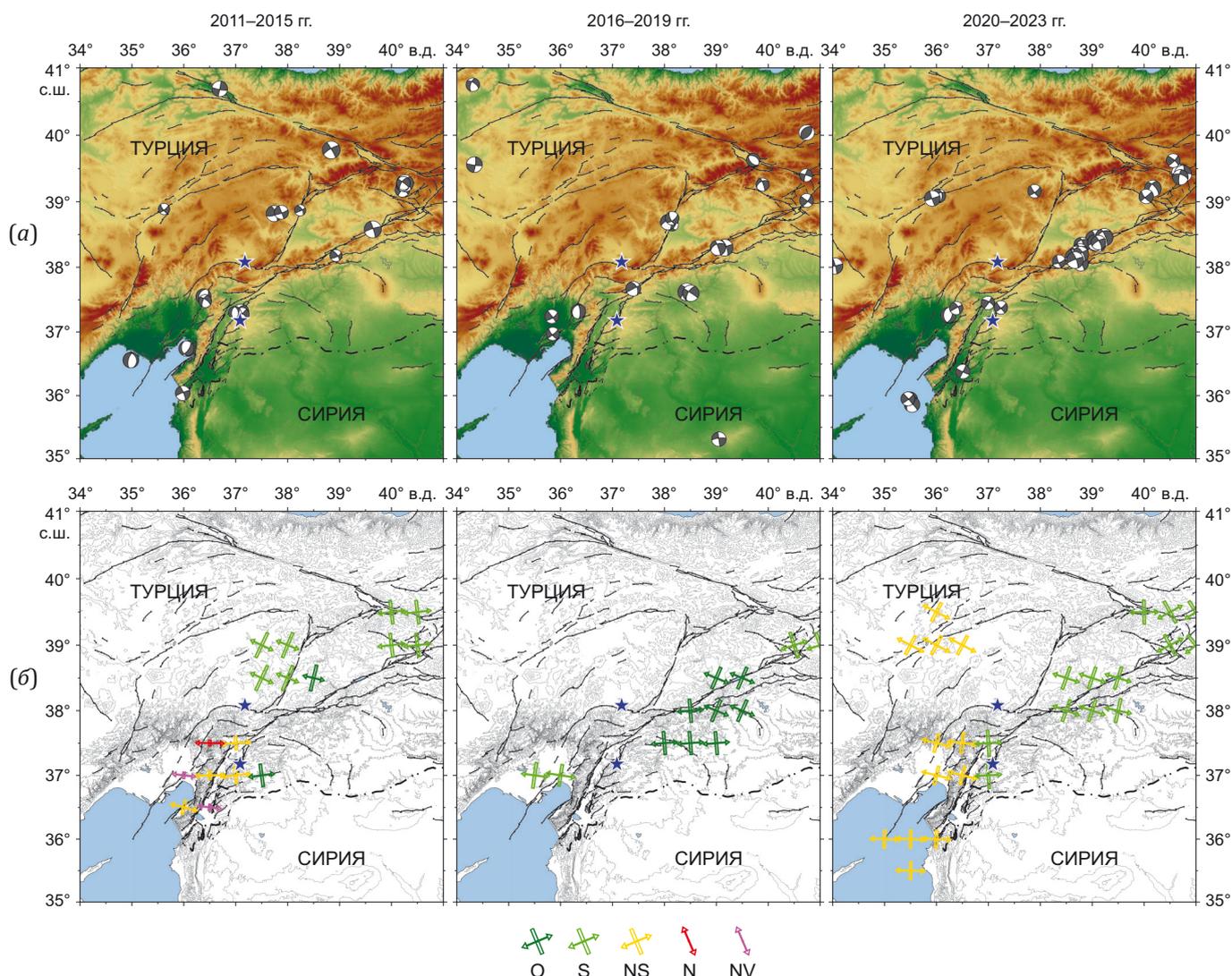


Рис. 6. Фокальные механизмы землетрясений (а) и карты СТД (б) для временных периодов: 2011–2015 гг.; 2016–2019 гг.; 2020–2023 гг. Классификация режимов СТД: О – косой сдвиг, S – горизонтальный сдвиг, NS – транстенсия, N – растяжение, NV – переходный режим от вертикального сдвига к растяжению.

Fig. 6. Focal mechanisms of earthquakes (a) and STD maps (b) for time periods: 2011–2015 гг.; 2016–2019 гг.; 2020–2023 гг. The classification of STD modes: O – oblique, S – strike-slip fault, NS – transtension, N – normal tension, NV – undertensional.

Значение нижней границы магнитуды событий, для которых определены фокальные механизмы, понижается с течением времени. Если за период с 1976 по 2010 г. фокальные механизмы определялись для сильных землетрясений и событий умеренной силы, то начиная с 2011 г. (момент расширения сети сейсмических станций) стало возможным определение фокальных механизмов для более слабых землетрясений. Количество землетрясений с $M \geq 5$ для рассматриваемых периодов за последние 24 года изменяется в диапазоне от 7 до 15. Наименее активным для Восточной Анатолии является период с 2011 по 2019 г. (1.0–1.4 события/год). В последний период наблюдается повышение числа событий, ~5 землетрясений/год соответственно.

Рассмотрим сейсмическую активность в разломных зонах САРЗ и ВАРЗ в отдельные временные перио-

ды. Во все рассматриваемые периоды Северо-Анатолийская зона разломов характеризуется отсутствием сейсмической активности, и лишь в отдельные временные периоды можно наблюдать единичные события. В Восточно-Анатолийской системе разломов отдельно рассмотрим северную и южную часть. Северная часть этой системы активна во все рассматриваемые периоды. В южной части ВАРЗ до 2010 г. наблюдается затишье, а с 2011 г. в области будущих землетрясений 6 февраля 2023 г. происходят отдельные землетрясения. Полученные результаты позволяют отметить, что геодинамическая обстановка в южной части ВАРЗ (место будущих землетрясений 6 февраля 2023 г.) начала меняться с 2011 г. В последний временной период (2020 – январь 2023 г.) наблюдается рост числа землетрясений не только в восточной части, а по всей территории Турции [Sycheva, 2024].

При расчете СТД вклад каждого события определяется весовым коэффициентом, зависящим от магнитуды землетрясения и вычисленным по выражению $w=0.07 \cdot (M+6)$. Подход к построению весовой функции описан в работах [Yunga, 2002; Sycheva et al., 2020]. В дальнейшем рассматриваются те области осреднения, в которых коэффициент k (каппа, т.е. интенсивность результирующей матрицы) превышает это значение из табл. 4 в работе [Yunga, 1990, с. 88–89], где представлены мода и критическое значение параметра k , соответствующие разным кумулятивным вероятностям и объему выборки. Расчет СТД выполнен для узловых точек, в круговую область которой попало два события и более. Основным приемом исследования в СТД являются статистические операции над матрицами, описывающими механизм очага землетрясения [Yunga, 1990]. Рассмотрение минимум двух землетрясений в некоторых ячейках исследуемой области не противоречит этому подходу. В предпоследнем столбце указанной таблицы представлен количественный диапазон числа землетрясений в ячейке при расчете СТД для разных временных периодов. Минимальное количество событий в ячейке соответствует первому значению, максимальное – второму. На картах СТД за рассматриваемые периоды времени согласно классификации режимов СТД в работе [Yunga, 1997] проявляются такие режимы деформации, как горизонтальный сдвиг (S), растяжение (N), переходный режим от деформации растяжения к горизонтальному сдвигу (транстенсия, NS), переходный режим от вертикального сдвига к растяжению (NV) и косой сдвиг (O). В северной части ВАРЗ для всех временных периодов наблюдается режим деформации горизонтальный или косой сдвиг. В южной части ВАРЗ, куда входит область землетрясений 6 февраля 2023 г., режимы деформации представлены для двух временных периодов: 2011–2015 гг. – это режим транстенсии и растяжения, 2020–2023 гг. – преобладающим является режим транстенсии на западном крыле ВАРЗ и горизонтальный сдвиг на восточном. Отсутствие режимов деформации на картах СТД в южной части ВАРЗ в другие временные периоды можно объяснить низкой сейсмической активностью (недостаточность данных для определения режима СТД). Для всех временных периодов определено среднее значение направления оси укорочения, полученные значения представлены в последней колонке табл. 4 [Yunga, 1990, с. 88–89]. Усредненное значение азимута оси укорочения в рассматриваемые периоды меняется от 355 до 18°, с 2016 г. устанавливается стабильное значение – 5° (меридиональное направление).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты вызывают некоторые сомнения в том, что второе землетрясение могло бы стать целевым для прогноза по аномалиям 2021 г. Изначально видно, что вокруг первого эпицентра расчетные области плотно лежат, а при выходе к северу они лишь немного прихватывают эпицентр второго землетря-

сения. Более того, в расчетной области с центром в эпицентре второго землетрясения вообще нет аномалий в этот период по любому порогу (см. рис. 3). Это уже как бы наводит на подозрения, что напряжение достигло критического в районе первого ЗЛТ (и, в целом, южнее обоих эпицентров). В 2022 г. расчетные области с аномалиями в большом количестве размещаются северо-западнее, что говорит о появлении там дополнительных зон нестабильности, желтые области слегка перекрыли красные в районе будущих эпицентров. Т.е. напряжение достигло предела, и к 2022 г. вместо землетрясения произошло дополнительно расширение области критических напряжений. Это может работать, если в ожидании разрядки напряжения имеют возможность передаваться какое-то время рядом расположенным концентраторам напряжений, тогда первоначально наметившийся очаг просто активируется несколько позже. Эти рассуждения на уровне гипотезы – почему аномалии прошли двумя сериями, и почему первая серия точно выделяет зону с эпицентром первого землетрясения. И если для первого землетрясения проявился естественный ход событий, то для второго потребовалось, чтобы сначала произошло первое. В работе [Rebetsky, 2023] высказывается предположение, что второе турецкое землетрясение могло быть вызвано изменениями напряжений, которые произошли в коре региона после первого сильного землетрясения. Результаты этой работы показывают, что кулоновы напряжения в системах близко расположенных и разноориентированных разломов могут быть подвержены резким изменениям в процессе развития землетрясения на одном из опасных участков. В работе [Tikhotsky et al., 2023] отмечено, что если реализован этот сценарий, то это значит, что поле напряжения в окрестности сильного землетрясения может меняться почти мгновенно.

Вызывает интерес период с 2011 по 2015 г. по результатам моделирования СТД (рис. 6). В области будущих землетрясений на этом периоде видны практически все варианты геодинамических режимов, в то время как в этот же период (с 2012 по 2015 г.) наблюдается большинство ложных аномалий (9 из 21). Для геодинамики это интересный факт, возможно даже предвестник сильного события, но для LURR сроки ожидания выходят за пределы допустимого, ибо землетрясения там случились только спустя десять лет.

Важные изменения отмечены в период появления прогнозных аномалий 2021–2022 гг. Небольшой блок, который расположен северо-западнее Восточно-Анатолийского разлома, «отметился» на северном фланге транстенсией, а это сложное геодинамическое состояние (переходный режим от горизонтального сдвига к растяжению). Стоит отметить, что там с 1976 г. не было сейсмической активности, достаточной для расчетов СТД. На самом разломе именно с 2020 по 2022 г. реализовалась ситуация (рис. 6), когда с запада преобладает транстенсия, а с востока по-прежнему простые сдвиги. При этом зоны косого сдвига повторяются на

всех периодах (рис. 6), т.е. основное изменение 2020–2022 гг. – это появление южнее зон с трансенсией, которых ранее не было совсем. Это также может быть причиной того, почему аномалии LURR сначала появились одной группой на юге, а потом дополнились группой в зоне на северо-западе – из-за включения этого блока. Второе ЗЛТ из дублета, скорее всего, является результатом этой активизации. Кроме того, отметим, что именно в 2021–2022 гг., когда был обозначен прогноз по методу LURR, Восточно-Анатолийский разлом активизировался (в решениях СТД) практически полностью, вплоть до акватории, где он заканчивается на картах. При этом при движении на юг режим горизонтального сдвига постепенно переходит в трансенсию, а в эпицентральной зоне первого землетрясения трансенсия с запада встречается со сдвигом на востоке.

5. ВЫВОДЫ

В работе предлагается оригинальный подход к методологии LURR, который был применен к анализу сейсмичности в районе Восточно-Анатолийского разлома, где в 2023 г. произошли два сильных и разрушительных землетрясения (06.02.2003 г., $M_w=7.8$, 06.02.2003 г., $M_w=7.6$). Для обработки данных авторы использовали программный комплекс Seis-ASZ, разработанный в ИМГиГ ДВО РАН, и собственные методики по определению параметров обработки и расчетных выборок. В частности, это касается определения параметров расчета параметра LURR во времени, правил выявления аномалий LURR, условий сканирования территории, которая во много раз превышает расчетную площадь, и выбора объектов прогноза.

Расчеты показали удовлетворительные результаты по выявлению аномалий LURR перед сильными землетрясениями. На исследуемой территории параметр LURR проявляет высокую активность. Это заставило авторов использовать высокий порог обнаружения аномалий, равный десяти (на Сахалине обходились значением три). При таком пороге количество аномалий в отдельных областях расчета не превышает 5 за 23 года, а в основной массе областей их в среднем две. 43 % аномалий по порогу 10 произошли в полугодовой период до дублета, и они рассматриваются авторами как предвестники. Первая серия аномалий появилась в 2021 г., а области расчета, в которых они зарегистрированы, компактно покрывают ВАРЗ, включая эпицентры землетрясений 2023 г.

Впервые в практике авторов результаты анализа по методу LURR сопоставлялись с результатами реконструкции по методу СТД, причем основной задачей являлось выстроить динамику процесса подготовки землетрясения в его финальной части – от появления аномалии LURR до землетрясения. При этом также учитывался период до появления аномалии (почти 20 лет). Результаты исследования показали, что в период аномального поведения LURR (прогнозный период) наблюдались наиболее значимые изменения геоди-

намического режима, равно как и резкий рост общей сейсмической активности. В дальнейшем представляет интерес развивать кооперацию двух методов (LURR и СТД).

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Abdelmeguid M., Zhao Ch., Yalcinkaya E., Gazetas G., Elbanna A., Rosakis A., 2023. Dynamics of Episodic Super-shear in the 2023 M7.8 Kahramanmaraş/Pazarcik Earthquake, Revealed by Near-Field Records and Computational Modeling. *Communications Earth & Environment* 4, 456. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01131-7>.
- Acarel D., Cambaz M.D., Turhan F., Mutlu A.K., Polat R., 2019. Seismotectonics of Malatya Fault, Eastern Turkey. *Open Geosciences* 11 (1), 1098–1111. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0085>.
- Aktug B., Ozener H., Dogru A., Sabuncu A., Turgut B., Halicioglu K., Yilmaz O., Havazli E., 2016. Slip Rates and Seismic Potential on the East Anatolian Fault System Using an Improved GPS Velocity Field. *Journal of Geodynamics* 94–95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001>.
- Ambraseys N.N., 1989. Temporary Seismic Quiescence: SE Turkey. *Geophysical Journal International* 96 (2), 311–331. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1989.tb04453.x>.
- B.U. KOERI-RTMC Earthquake Catalog, 2023. Available from: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/moment-tensor-solutions> (Last Accessed March 12, 2023).
- Chen J., Zilio L.D., Zhang H., Yang G., Shi Y., Liu Ch., 2023. Decoding Stress Patterns of the 2023 Turkey-Syria Earthquake Doublet. Preprint (v. 1). Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2922091/v1>.
- Feng Y., Ji G., Cui W., 2012. Parallel Computing for LURR of Earthquake Prediction. *Geophysical Journal International* 2012, 567293. <https://doi.org/10.1155/2012/567293>.
- Global CMT Catalog, 2023. Available from: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (Last Accessed March 12, 2023).
- Gong F.-Q., Chen W., Song L., Yan J.-Yi., 2019. Load-Unload Response Ratio Characteristics of Rock Materials and Their Application in Prediction of Rockburst Proneness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 5445–5466, <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01474-6>.

Mai P.M., Aspiotis Th., Aquib T.A., Cano E.V., Cruz D.C., Espindola-Carmona A., Li B., Li X. et al., 2023. The Destructive Earthquake Doublet of February 6, 2023, in South-Central Türkiye and Northwestern Syria: Initial Observations and Analyses. *The Seismic Record* 3 (2), 105–115. <https://doi.org/10.1785/0320230007>.

Melgar D., Taymaz T., Ganas A., Crowell B., Öcalan T., Kahraman M., Tsironi V., Yolsal-Çevikbilen S. et al., 2023. Sub and Super-Shear Ruptures during the 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6 Earthquake Doublet in SE Türkiye. *Seismica* 2 (3), 1–10. <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.387>.

Okuwaki R., Yuji Y., Taymaz T., Hicks S., 2023. Multi-Scale Rupture Growth with Alternating Directions in a Complex Fault Network during the 2023 South-Eastern Türkiye and Syria Earthquake Doublet. *Geophysical Research Letters* 50 (12), e2023GL103480. <https://doi.org/10.1029/2023GL103480>.

Rebetsky Y.L., 2023. Tectonophysical Zoning of Seismogenic Faults in Eastern Anatolia and February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 59, 851–877. <https://doi.org/10.1134/S1069351323060174>.

Sycheva N.A., 2024. Seismicity and Crustal Seismotectonic Deformations of the Anatolian Plate (Turkey). *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0743 (in Russian) [Сычева Н.А. Сейсмичность и сейсмотектонические деформации земной коры Анатолийской плиты (Турция) // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 1. 0743]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0743>.

Sycheva N.A., Bogomolov L.M., Kuzikov S.I., 2020. Computational Technologies in Seismological Research (on the Example of KNET, Northern Tian Shan). *IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk*, 358 p. (in Russian) [Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Кузиков С.И. Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере KNET, Северный Тянь-Шань). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2020. 358 с.]. <https://doi.org/10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2>.

Tan O., Tapirdamaz M.C., Yörük Ah., 2008. The Earthquake Catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 17 (2), 405–418.

Tikhotsky S.A., Tatevosyan R.E., Rebetsky Yu.L., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., 2023. The 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Turkey: Seismic Movements along Conjugated Faults. *Doklady Earth Sciences* 511, 703–709. <https://doi.org/10.1134/s1028334x23600974>.

USGS Search Earthquake Catalog, 2023. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Last Accessed March 01, 2023).

Yin X.-C., Chen X.-Zh., Song Zh.-P., Yin C., 1995. A New Approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory. *Pure and Applied Geophysics* 145, 701–715. <https://doi.org/10.1007/bf00879596>.

Yin X.-C., Zhang L.-P., Zhang H.-H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J., 2006. LURR's Twenty Years and Its Perspective. *Pure and Applied Geophysics* 163, 2317–2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>.

Yu C., Wang S., Yu H., 2022. Study of the Electromechanical Coupling Process before the 2020 Ms 6.4 Yutian, China Earthquake. *Scientific Reports* 12, 17622. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22532-2>.

Yunga S.L., 1990. *Methods and Results of Seismotectonic Deformation Studies*. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.].

Yunga S.L., 1997. On the Classification of Seismic Moment Tensors on the Basis of Their Isometric Mapping onto a Sphere. *Doklady Earth Sciences* 352 (2), 253–255 (in Russian) [Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // Доклады РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255].

Yunga S.L., 2002. Study of Surface Movements and Deformation of the Crust in the Central Tien Shan, Kazakh Platform and Altai; Creation of Seismological Data Processing Software, and Data Processing. *Scientific Research Report. Obninsk*, 41 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Изучение движений поверхности и деформаций земной коры на территории Центрального Тянь-Шаня, Казахской платформы и Алтая; создание программ обработки сейсмологических данных, проведение обработки: Отчет о научно-исследовательской работе. Обнинск, 2002. 41 с.].

Zakupin A.S., 2016. Program Complex for the Analysis of Instability of Seismic Process. *Geoinformatics* 1, 34–43 (in Russian) [Закупин А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 34–43].

Zakupin A.S., Boginskaya N.V., 2021. Mid-Term Earthquake Prediction Using the LURR Method on Sakhalin Island: A Summary of Retrospective Studies for 1997–2019 and New Approaches. *Geosystems of Transition Zones* 5 (1), 27–45 (in Russian) [Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 1. С. 27–45]. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>.

Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A., Levin Y.N., 2018. Development of Medium-Term Prediction Methods: A Case Study of the August 14, 2016 Onor ($M_w=5.8$) Earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics* 59 (11), 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>.

Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V., 2020. Application of Methods of Analysis of Seismic Sequences SDP and LURR for Earthquake Prediction on Sakhalin. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 1, 66–78 (in Russian) [Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СПП для прогноза землетрясений на Сахалине // Геофизические процессы и биосфера. 2020. № 1. С. 66–78]. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>.

Zhang W.J., Chen Y.M., Zhan L.T., 2006. Loading/Unloading Response Ratio Theory Applied in Predicting Deep-Seated

Landslides Triggering. *Engineering Geology* 82 (4), 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.005>.

Zhao F., He M.C., 2017. Size Effects on Granite Behavior under Unloading Rockburst Test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76, 1183–1197. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0903-5>.

Zhu F.C., Ai C.C., Liu B.X., Tian F.L., 2016. Study on Load/Unload Response Ratio of Brittle Rocks under Different Stress Paths. *Metal Mine* 45 (4), 52–57 (in Chinese).

Zilio D.L., Ampuero J.-P., 2023. Earthquake Doublet in Turkey and Syria. *Communications Earth & Environment* 4, 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

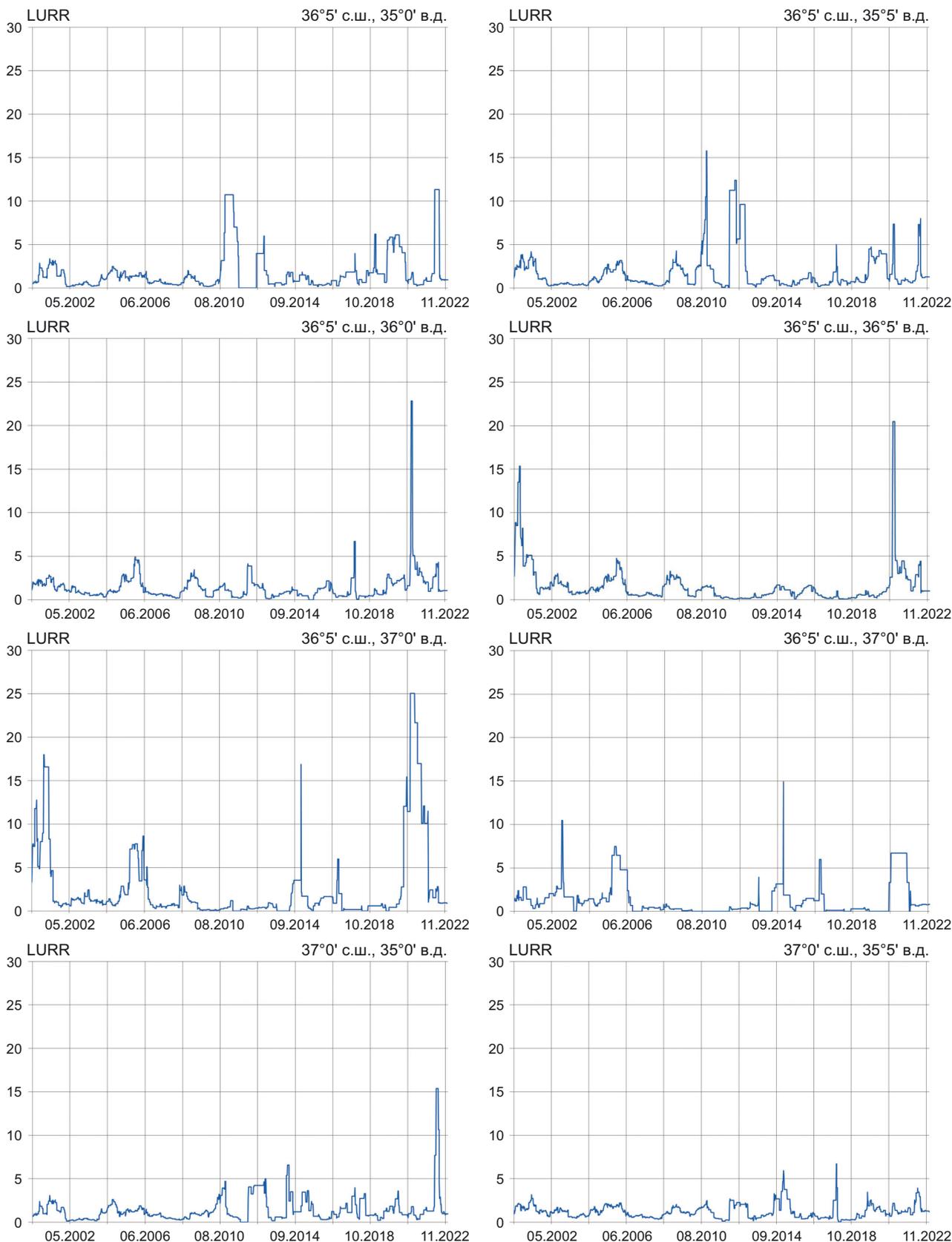
Таблица 1.1. Координаты центров расчетных областей и количество землетрясений в них (с $M=3.3-5.0$) (красным цветом отмечены области расчета с недостаточным количеством расчетных землетрясений, порог 200 за 23 года)

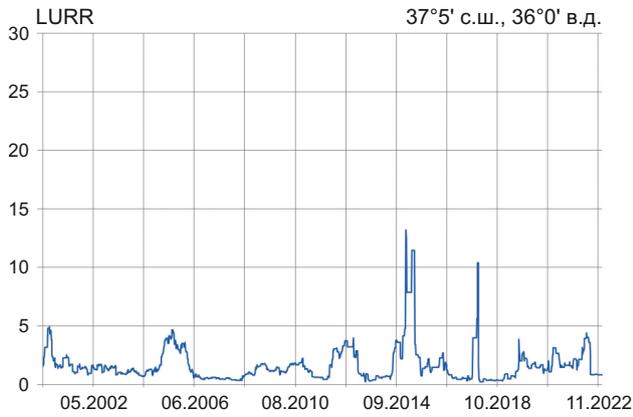
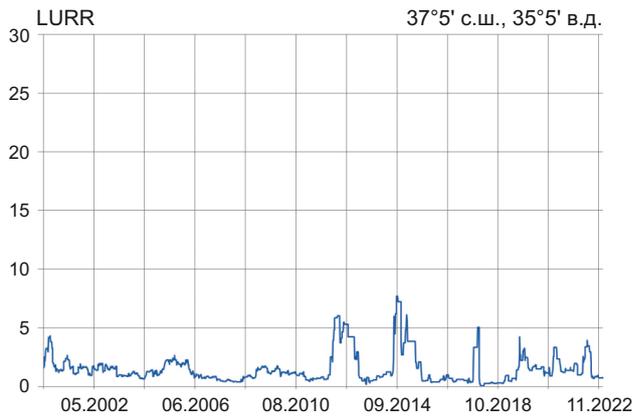
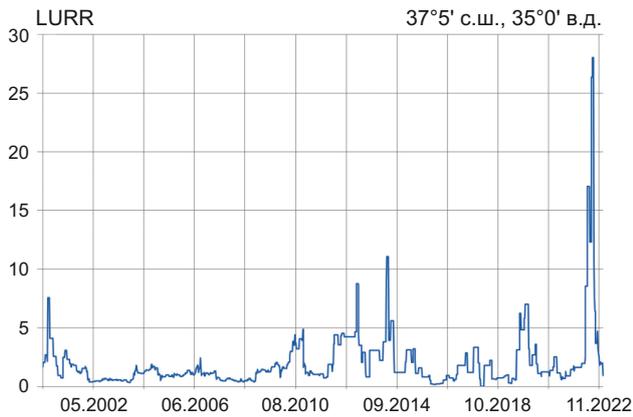
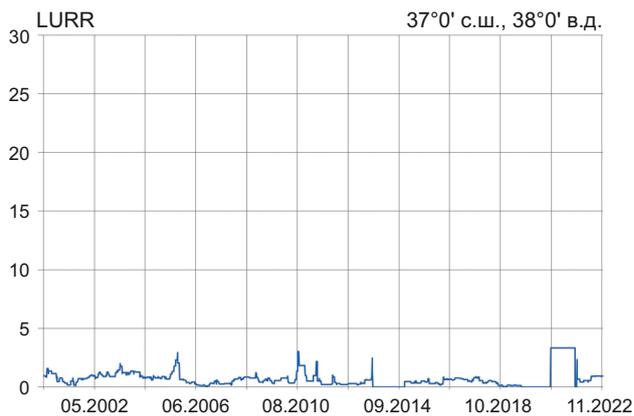
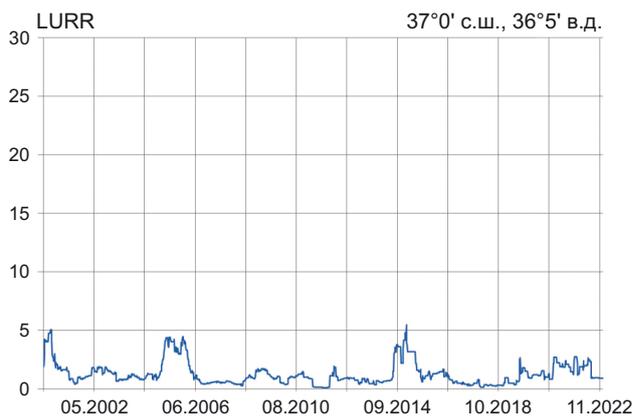
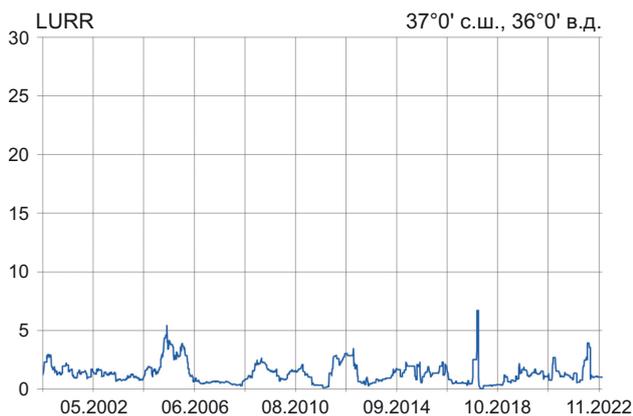
Table 1.1. Coordinates of the centers of the calculation areas and the number of earthquakes in them (with $M=3.3-5.0$) (the calculation areas with an insufficient number of calculated earthquakes are marked in red, the threshold is 200 in 23 years)

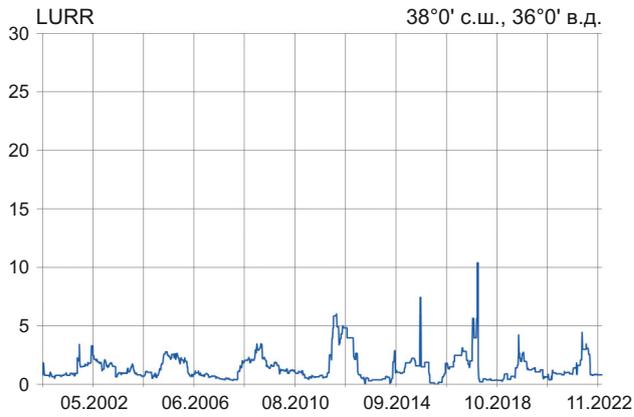
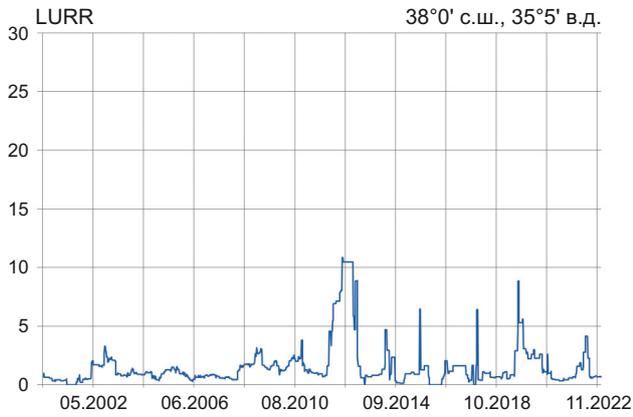
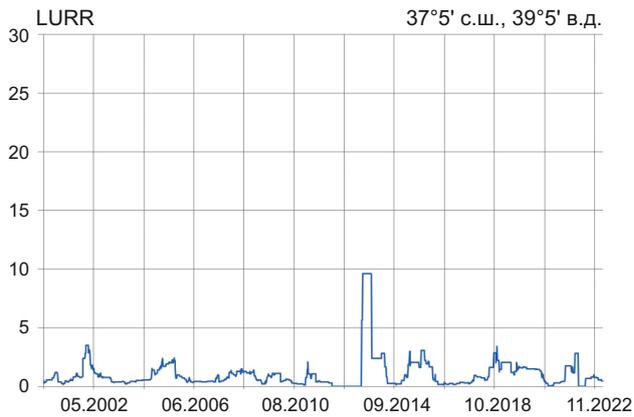
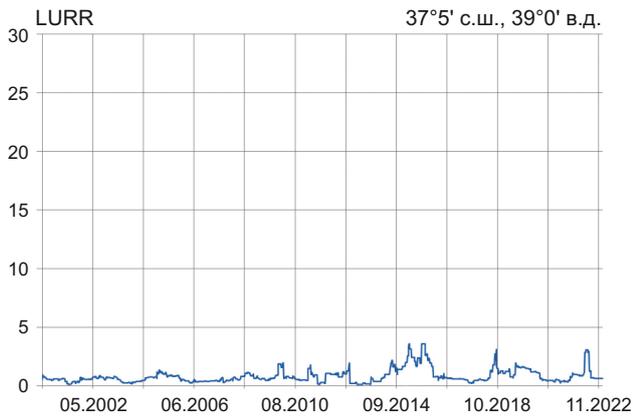
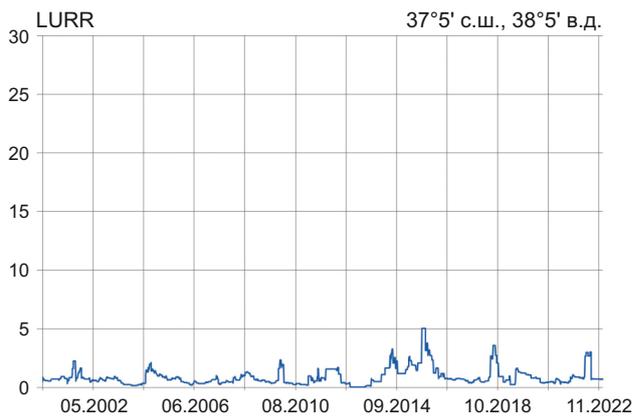
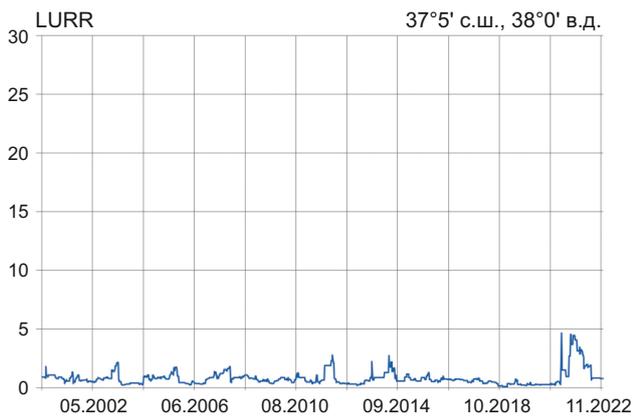
№	Координаты центра		Кол-во ЗЛТ $3.3 \leq M \leq 5$	№	Координаты центра		Кол-во ЗЛТ $3.3 \leq M \leq 5$	№	Координаты центра		Кол-во ЗЛТ $3.3 \leq M \leq 5$
	$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$			$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$			$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	
1	36.0	35.0	128	34	37.5	35.0	278	67	39.0	35.0	112
2	36.0	35.5	164	35	37.5	35.5	460	68	39.0	35.5	127
3	36.0	36.0	165	36	37.5	36.0	482	69	39.0	36.0	150
4	36.0	36.5	146	37	37.5	36.5	539	70	39.0	36.5	150
5	36.0	37.0	87	38	37.5	37.0	383	71	39.0	37.0	129
6	36.0	37.5	30	39	37.5	37.5	277	72	39.0	37.5	194
7	36.0	38.0	23	40	37.5	38.0	386	73	39.0	38.0	283
8	36.0	38.5	20	41	37.5	38.5	459	74	39.0	38.5	853
9	36.0	39.0	19	42	37.5	39.0	714	75	39.0	39.0	1012
10	36.0	39.5	26	43	37.5	39.5	397	76	39.0	39.5	1251
11	36.0	40.0	62	44	37.5	40.0	43	77	39.0	40.0	1196
12	36.5	35.0	219	45	38.0	35.0	191	78	39.5	35.0	119
13	36.5	35.5	294	46	38.0	35.5	337	79	39.5	35.5	135
14	36.5	36.0	362	47	38.0	36.0	421	80	39.5	36.0	163
15	36.5	36.5	317	48	38.0	36.5	418	81	39.5	36.5	137
16	36.5	37.0	208	49	38.0	37.0	302	82	39.5	37.0	129
17	36.5	37.5	131	50	38.0	37.5	298	83	39.5	37.5	215
18	36.5	38.0	32	51	38.0	38.0	552	84	39.5	38.0	274
19	36.5	38.5	59	52	38.0	38.5	882	85	39.5	38.5	319
20	36.5	39.0	44	53	38.0	39.0	883	86	39.5	39.0	373
21	36.5	39.5	31	54	38.0	39.5	836	87	39.5	39.5	719
22	36.5	40.0	66	55	38.0	40.0	582	88	39.5	40.0	1183
23	37.0	35.0	297	56	38.5	35.0	105	89	40.0	35.0	204
24	37.0	35.5	482	57	38.5	35.5	199	90	40.0	35.5	165
25	37.0	36.0	520	58	38.5	36.0	236	91	40.0	36.0	195
26	37.0	36.5	504	59	38.5	36.5	202	92	40.0	36.5	190
27	37.0	37.0	343	60	38.5	37.0	131	93	40.0	37.0	162
28	37.0	37.5	191	61	38.5	37.5	221	94	40.0	37.5	154
29	37.0	38.0	260	62	38.5	38.0	466	95	40.0	38.0	216
30	37.0	38.5	157	63	38.5	38.5	894	96	40.0	38.5	229
31	37.0	39.0	145	64	38.5	39.0	880	97	40.0	39.0	321
32	37.0	39.5	66	65	38.5	39.5	941	98	40.0	39.5	346
33	37.0	40.0	36	66	38.5	40.0	1086	99	40.0	40.0	680

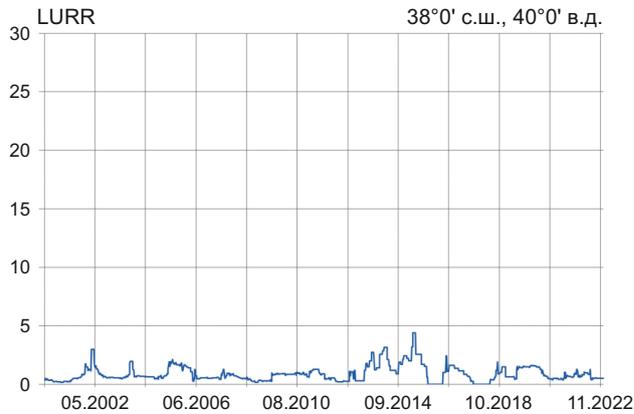
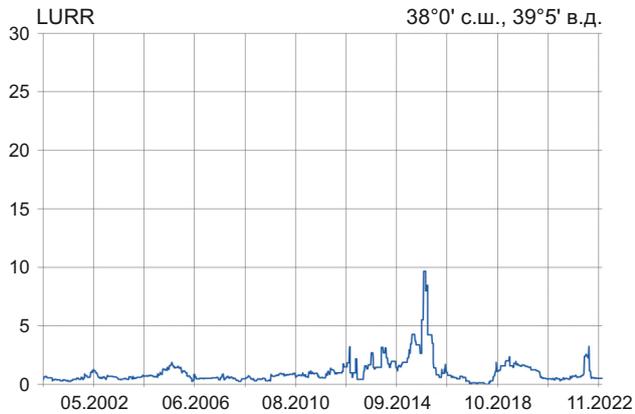
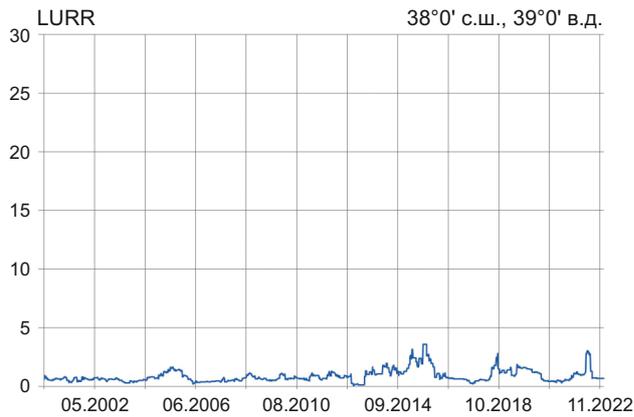
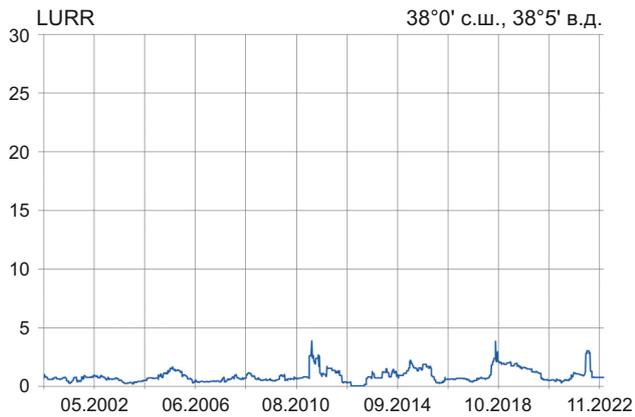
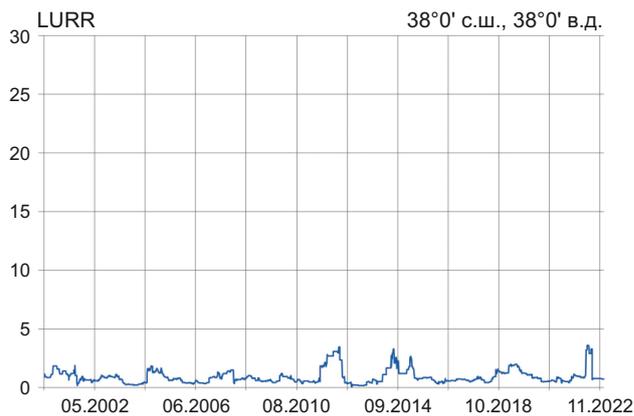
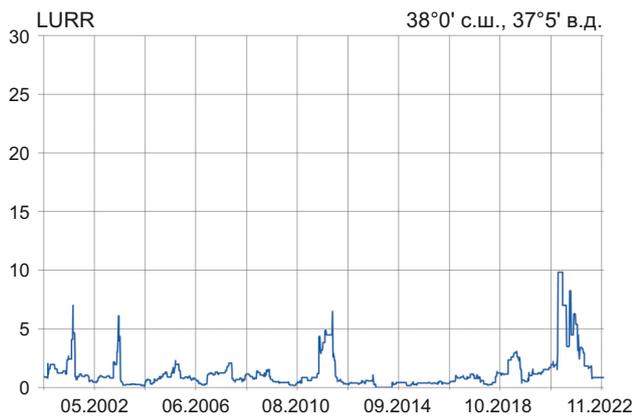
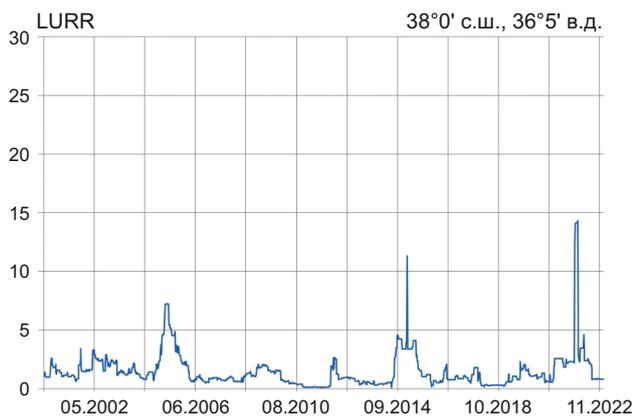
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 / APPENDIX 2

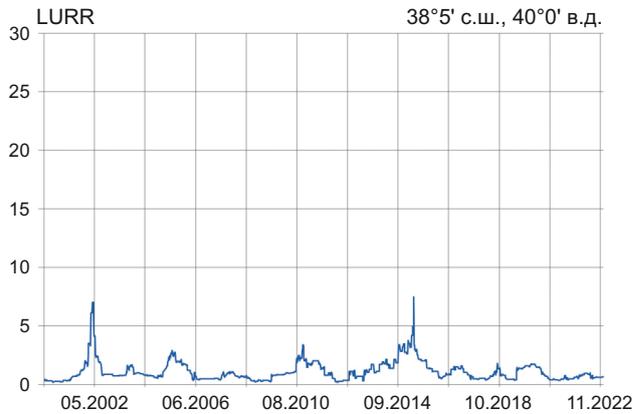
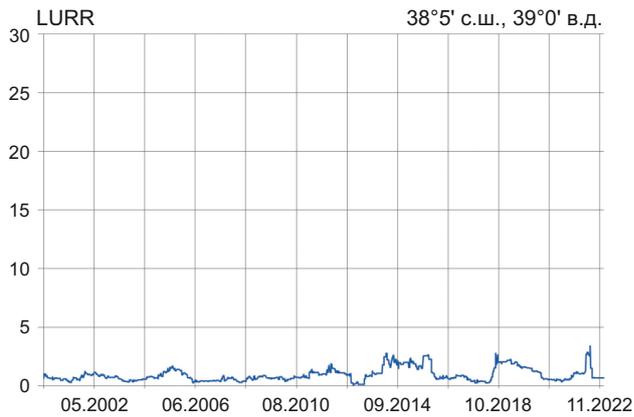
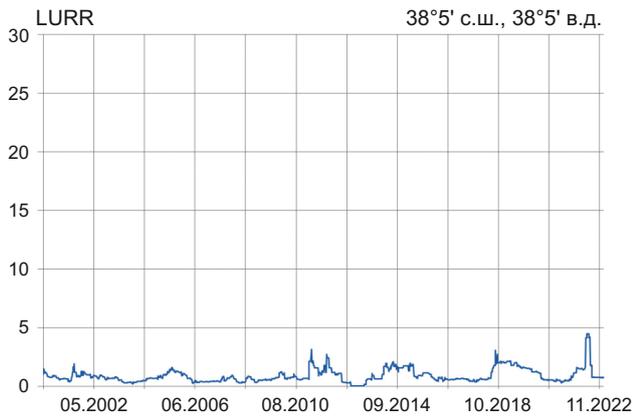
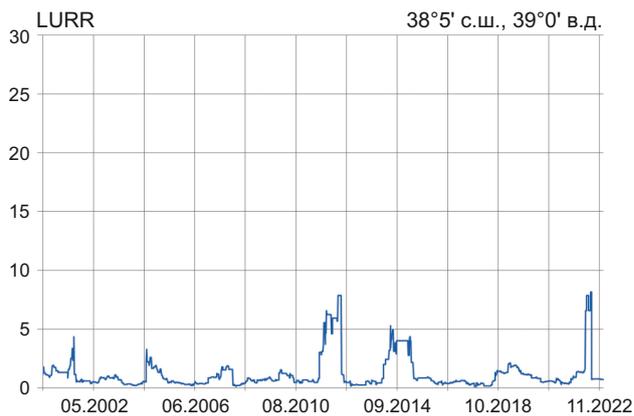
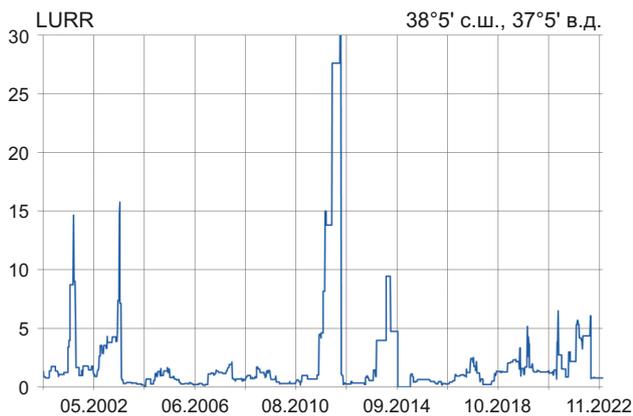
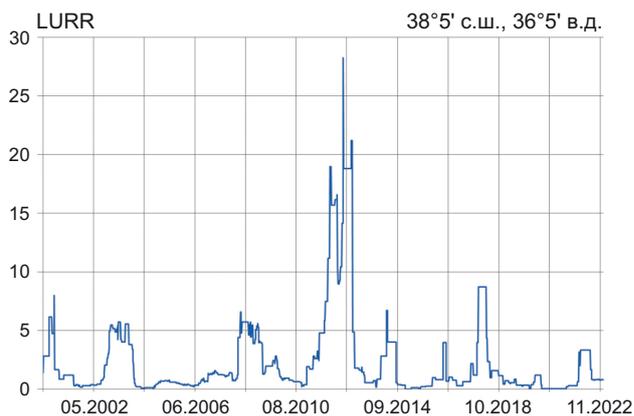
ГРАФИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА LURR В РАСЧЕТНЫХ ОБЛАСТЯХ
 GRAPHS OF CHANGES IN THE LURR PARAMETER IN THE COMPUTATIONAL DOMAINS

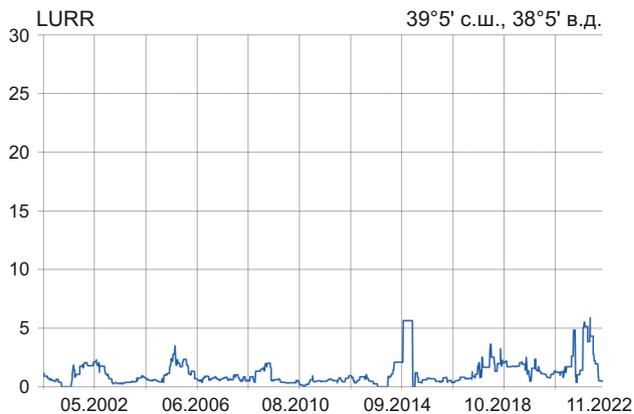
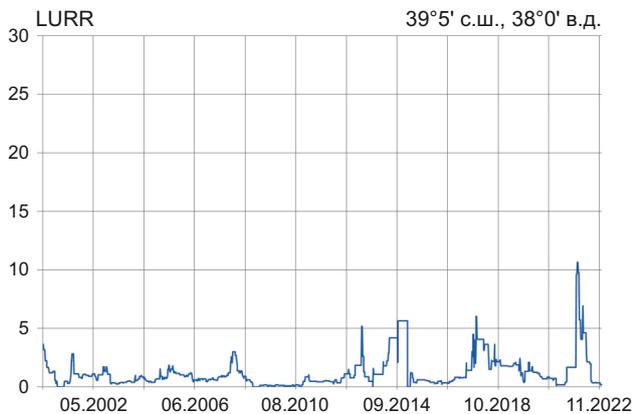
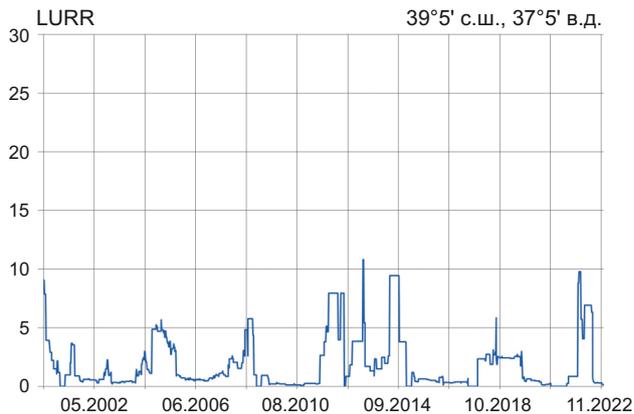
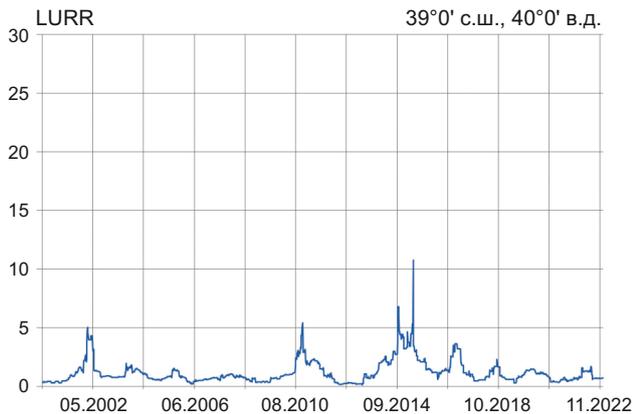
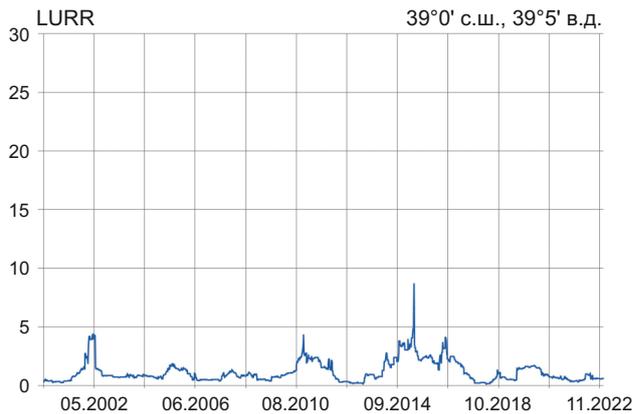
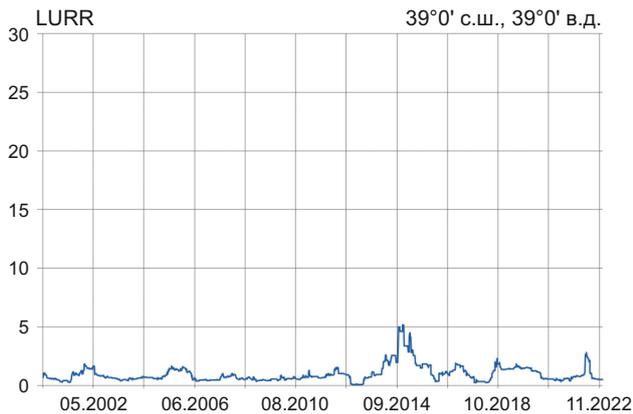
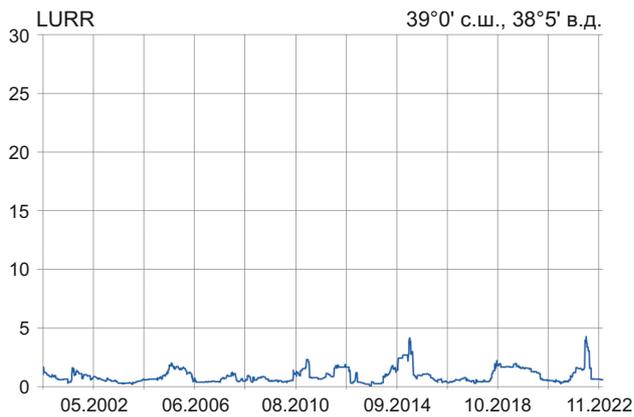
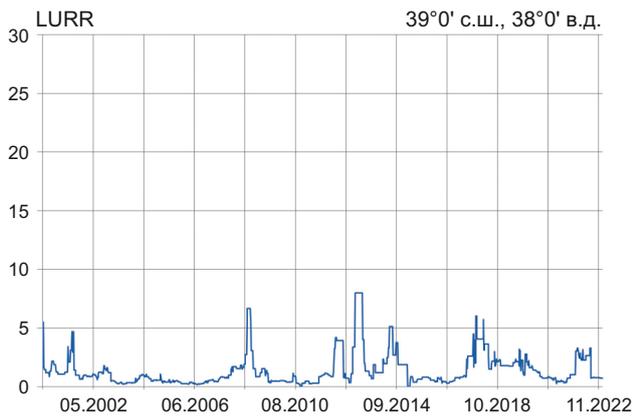


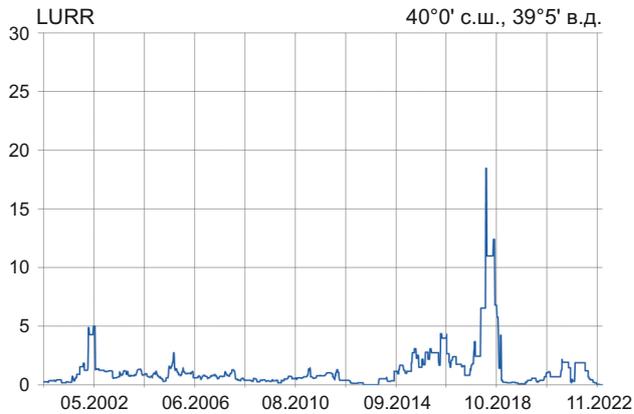
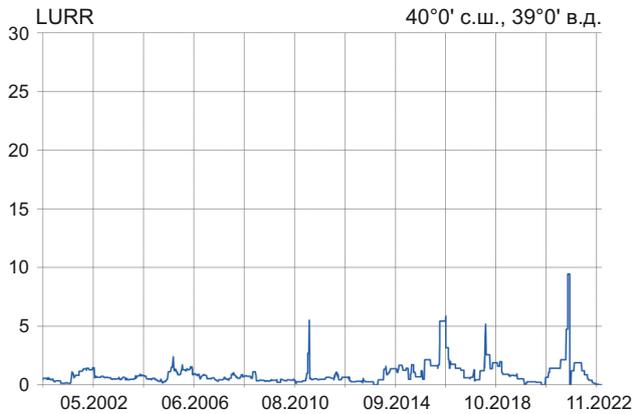
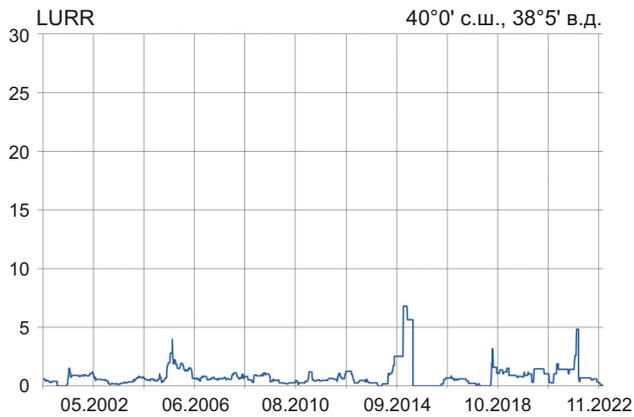
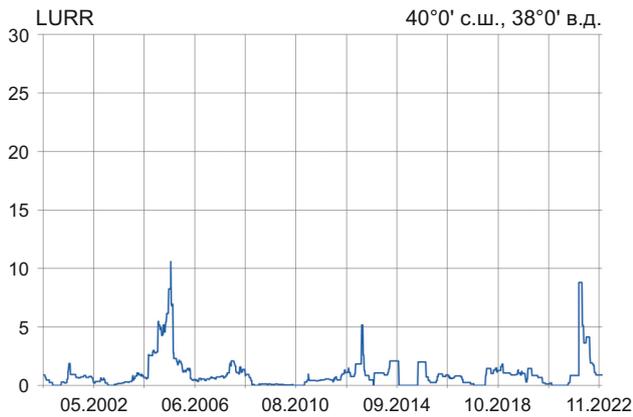
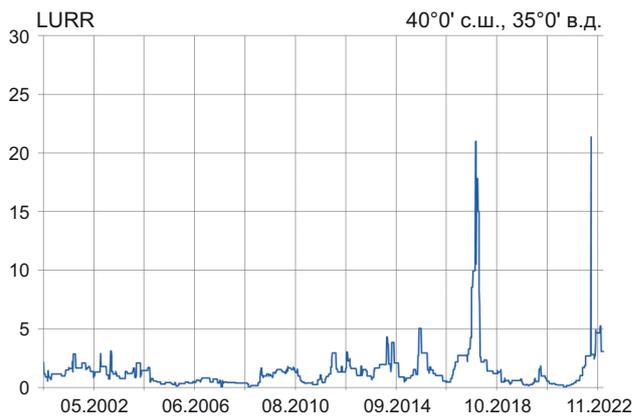
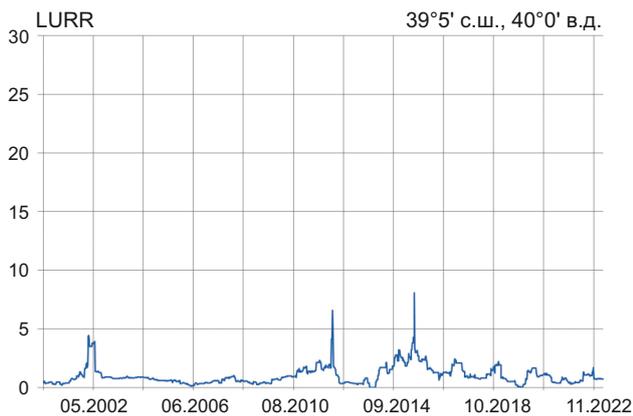
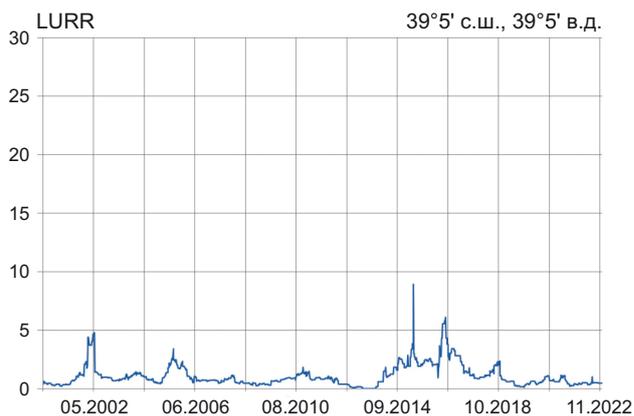
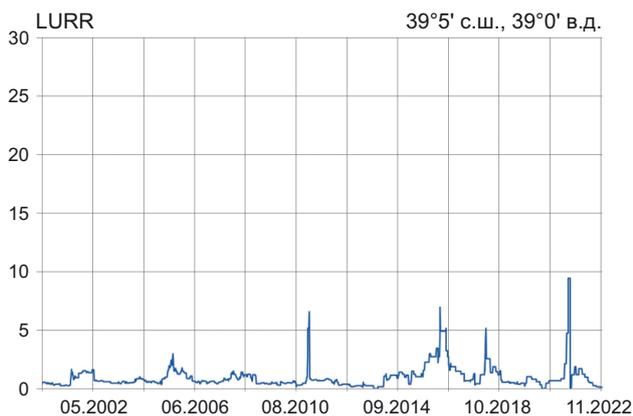












ПРИЛОЖЕНИЕ 3 / APPENDIX 3

Таблица 3.1. 56 расчетных областей (ликвидные) и данные по первым вступлениям аномальных вариаций при порогах в 5, 7.5 и 10

Table 3.1. 56 settlement areas (liquid) and data on the first occurrences of anomalous variations at thresholds of 5, 7.5 and 10

№	Координаты центра		Кол-во ЗЛТ 3.3≤M≤5	Отсечки аномалий по порогу		
	φ, °	λ, °		D=5	D=7.5	D=10
1	36.5	35.0	219	06.2010, 04.2020, 11.2022	06.2010, 11.2022	06.2010, 11.2022
2	36.5	35.5	294	04.2010, 09.2012, 06.2021, 12.2022	04.2010, 09.2012, 12.2022	04.2010, 09.2012
3	36.5	36.0	362	07.2018, 08.2021	08.2021	08.2021
4	36.5	36.5	317	02.2001, 07.2021	02.2001, 07.2021	02.2001, 07.2021
5	36.5	37.0	208	02.2000, 05.2006, 03.2021	02.2000, 03.2021	02.2000, 03.2021
6	37.0	35.0	297	10.2014, 12.2022	12.2022	12.2022
7	37.0	35.5	482	-	-	-
8	37.0	36.0	520	07.2018	-	-
9	37.0	36.5	504	-	-	-
10	37.0	37.0	343	08.2015, 08.2021	08.2015, 08.2021	08.2015, 08.2021
11	37.0	38.0	260	-	-	-
12	37.5	35.0	278	03.2001, 08.2013, 11.2014, 03.2020, 11.2022	08.2013, 11.2014, 11.2022	11.2022
13	37.5	35.5	460	10.2012, 02.2015	-	-
14	37.5	36.0	482	08.2015, 07.2018	08.2015, 07.2018	08.2015, 07.2018
15	37.5	36.5	539	03.2015	-	-
16	37.5	37.0	383	04.2015, 05.2022	04.2015, 05.2022	05.2022
17	37.5	37.5	277	08.2015, 07.2021	07.2021	07.2021
18	37.5	38.0	386	-	-	-
19	37.5	38.5	459	-	-	-
20	37.5	39.0	714	-	-	-
21	37.5	39.5	397	12.2013	12.2013	-
22	38.0	35.5	337	10.2012, 03.2016, 07.2018, 03.2020	10.2012, 03.2020	10.2012
23	38.0	36.0	421	10.2012, 03.2016, 05.2018	05.2018	05.2018
24	38.0	36.5	418	11.2005, 08.2015, 06.2022	08.2015, 06.2022	06.2022
25	38.0	37.0	302	09.2012, 05.2022	05.2022	05.2022
26	38.0	37.5	298	03.2002, 01.2004, 09.2012, 10.2021	10.2021	10.2021
27	38.0	38.0	552	-	-	-
28	38.0	38.5	882	-	-	-
29	38.0	39.0	883	-	-	-
30	38.0	39.5	836	05.2016	05.2016	-
31	38.0	40.0	582	-	-	-
32	38.5	36.0	236	08.2011, 11.2020, 09.2022	11.2020	11.2020
33	38.5	36.5	202	04.2001, 09.2003, 12.2008, 06.2012, 07.2018	06.2012, 07.2018	06.2012, 07.2018
34	38.5	37.5	221	02.2002, 01.2004, 05.2012, 11.2014	02.2002, 01.2004, 05.2012, 11.2014	02.2002, 01.2004, 05.2012
35	38.5	38.0	466	04.2012, 11.2022	04.2012, 11.2022	11.2022
36	38.5	38.5	894	-	-	-
37	38.5	39.0	880	-	-	-
38	38.5	39.5	941	11.2015	-	-

Таблица 3.1 (продолжение)

Table 3.1 (continued)

№	Координаты центра		Кол-во ЗЛТ 3.3≤M≤5	Отсечки аномалий по порогу		
	φ, °	λ, °		D=5	D=7.5	D=10
39	38.5	40.0	1086	12.2002, 12.2015	-	-
40	39.0	38.0	283	04.2009, 08.2013, 06.2018	08.2013	-
41	39.0	38.5	853	-	-	-
42	39.0	39.0	1012	-	-	-
43	39.0	39.5	1251	12.2015	-	-
44	39.0	40.0	1196	-	-	-
45	39.5	37.5	215	06.2012, 11.2013, 12.2014, 07.2022	06.2012, 11.2013, 12.2014, 07.2022	06.2012, 11.2013, 12.2014, 07.2022
46	39.5	38.0	274	05.2015, 07.2022	07.2022	07.2022
47	39.5	38.5	319	05.2015, 07.2022	-	-
48	39.5	39.0	373	09.2011, 12.2016, 02.2022	02.2022	-
49	39.5	39.5	719	12.2015, 02.2017	12.2015	-
50	39.5	40.0	1183	08.2012, 12.2015	-	-
51	40.0	35.0	204	03.2018, 12.2022	03.2018, 12.2022	03.2018, 12.2022
52	40.0	38.0	216	02.2006, 07.2022	02.2006, 07.2022	-
53	40.0	38.5	229	05.2015	-	-
54	40.0	39.0	321	12.2016, 02.2022	02.2022	-
55	40.0	39.5	346	10.2018	10.2018	10.2018
56	40.0	40.0	680	10.2002	-	-

Таблица 3.2. 16 областей расчета, где отмечались аномалии параметра LURR в период с 2021 по конец 2022 г. (по порогу 10)

Table 3.2. 16 calculation areas where anomalies in the LURR parameter were noted in the period from 2021 to the end of 2022 (at threshold 10)

№	Координаты центра		Кол-во ЗЛТ 3.3≤M≤5	Отсечки аномалий по порогу		
	φ, °	λ, °		D=5	D=7.5	D=10
1	36.5	35.0	219	06.2010, 04.2020, 11.2022	06.2010, 11.2022	06.2010, 11.2022
2	36.5	36.0	362	07.2018, 08.2021	08.2021	08.2021
3	36.5	36.5	317	02.2001, 07.2021	02.2001, 07.2021	02.2001, 07.2021
4	36.5	37.0	208	02.2000, 05.2006, 03.2021	02.2000, 03.2021	02.2000, 03.2021
5	37.0	35.0	297	10.2014, 12.2022	12.2022	12.2022
6	37.0	37.0	343	08.2015, 08.2021	08.2015, 08.2021	08.2015, 08.2021
7	37.5	35.0	278	03.2001, 08.2013, 11.2014, 03.2020, 11.2022	08.2013, 11.2014, 11.2022	11.2022
8	37.5	37.0	383	04.2015, 05.2022	04.2015, 05.2022	05.2022
9	37.0	37.5	277	08.2015, 07.2021	07.2021	07.2021
10	38.0	36.5	418	11.2005, 08.2015, 06.2022	08.2015, 06.2022	06.2022
11	38.0	37.0	302	09.2012, 05.2022	05.2022	05.2022
12	38.0	37.5	298	03.2002, 01.2004, 09.2012, 10.2021	10.2021	10.2021
13	38.5	38.0	466	04.2012, 11.2022	04.2012, 11.2022	11.2022
14	39.5	37.5	215	06.2012, 11.2013, 12.2014, 07.2022	06.2012, 11.2013, 12.2014, 07.2022	06.2012, 11.2013, 12.2014, 07.2022
15	39.5	38.0	274	05.2015, 07.2022	07.2022	07.2022
16	40.0	35.0	204	03.2018, 12.2022	03.2018, 12.2022	03.2018, 12.2022