

## 9 ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

### Введение

Геофизический мониторинг представляет собой систему наблюдений за сейсмичностью, геофизическими и геодинамическими процессами. Объектами наблюдений геофизического мониторинга являются сейсмические события природного и техногенного происхождения, геомагнитные и гравитационные поля [49, 50].

Ежегодно для оценки динамики сейсмических, геофизических и геодинамических процессов, а также выявления повышенной тектонической активности в местах расположения экологически опасных хозяйственных объектов проводят геофизический мониторинг по следующим направлениям:

сейсмический мониторинг, представляющий собой систему непрерывных круглосуточных наблюдений за происходящими сейсмическими событиями естественного и искусственного происхождения в широком диапазоне энергий и расстояний;

геомагнитный мониторинг, включающий непрерывные стационарные наблюдения за текущим состоянием геомагнитного поля и периодические наблюдения за геодинамическими процессами на полигонах.

Сейсмологические исследования позволяют изучать причины происхождения очагов землетрясений и определять их кинематические и динамические параметры, а также оценивать степень сейсмических воздействий, их опасность и риск для хозяйственных объектов; разрабатывать методы предсказания землетрясений.

Геомагнитные исследования направлены на изучение векового хода составляющих магнитного поля Земли. Наблюдения проводятся в геофизической обсерватории «Плещеницы» феррозондовым магнитометром LEMI-022, регистрирующим изменения во времени на горизонтальных –  $X$  и  $Y$  и вертикальной –  $Z$  составляющих.

Сеть геофизического мониторинга Беларуси структурно состоит из трех уровней: глобальный, региональный и локальный. Глобальный и региональные уровни мониторинга обеспечивают геофизические обсерватории «Плещеницы» и «Нарочь»; региональный и локальный – сети сейсмических станций в Солигорском и Островецком районах.

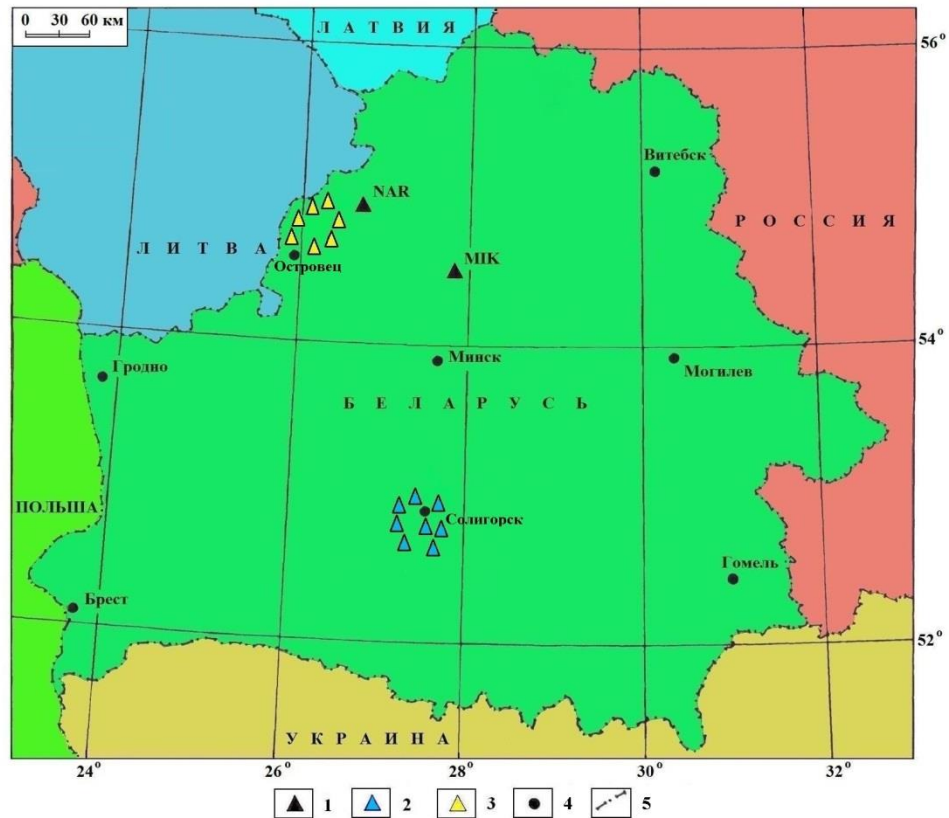
В 2022 г. сейсмологические наблюдения проведены Центром геофизического мониторинга НАН Беларуси в непрерывном режиме с использованием автоматизированных систем. Наблюдения проводились в следующих пунктах: геофизических обсерваториях «Плещеницы» и «Нарочь» и на двух локальных сетях сейсмических станций: первая в Солигорском районе (восемь сейсмических станций: «Волоты», «Тесово», «Устронь», «Чижовка», «Копачевичи», «Раёвка», «Махновичи», «Листопадовичи»); в Островецком районе (семь сейсмических станций: «Бояры», «Градовщизна», «Вадатишки», «Селище», «Горная Каймина», «Воробы», «Литвяны») (рисунок 9.1).

### Основной посыл и выводы

Количество зарегистрированных землетрясений в 2022 г. на глобальном уровне составляет 3263 событий, на региональном – 875 и локальном – 28 землетрясений. Анализ сейсмичности показал, что уровень сейсмической активности в 2022 г. повысился по отношению к 2021 г. на глобальном уровне, понизился на региональном и локальном уровнях, при этом на региональном – остается повышенным по отношению к среднему многолетнему значению.

В 2022 г. геомагнитной обсерваторией зафиксирована 61 магнитная буря, среднегодовое значение суммарных  $K$ -индексов составляет 18,45. Определены среднегодовые значения векового хода элементов  $D$  (556,26),  $H$  (17749),  $Z$  (48329),  $T$  (51485) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли

в 2022 г. был выше предыдущего года, и остается повышенным к средним многолетним значениям предыдущих годов, кроме значений элемента  $H$ .



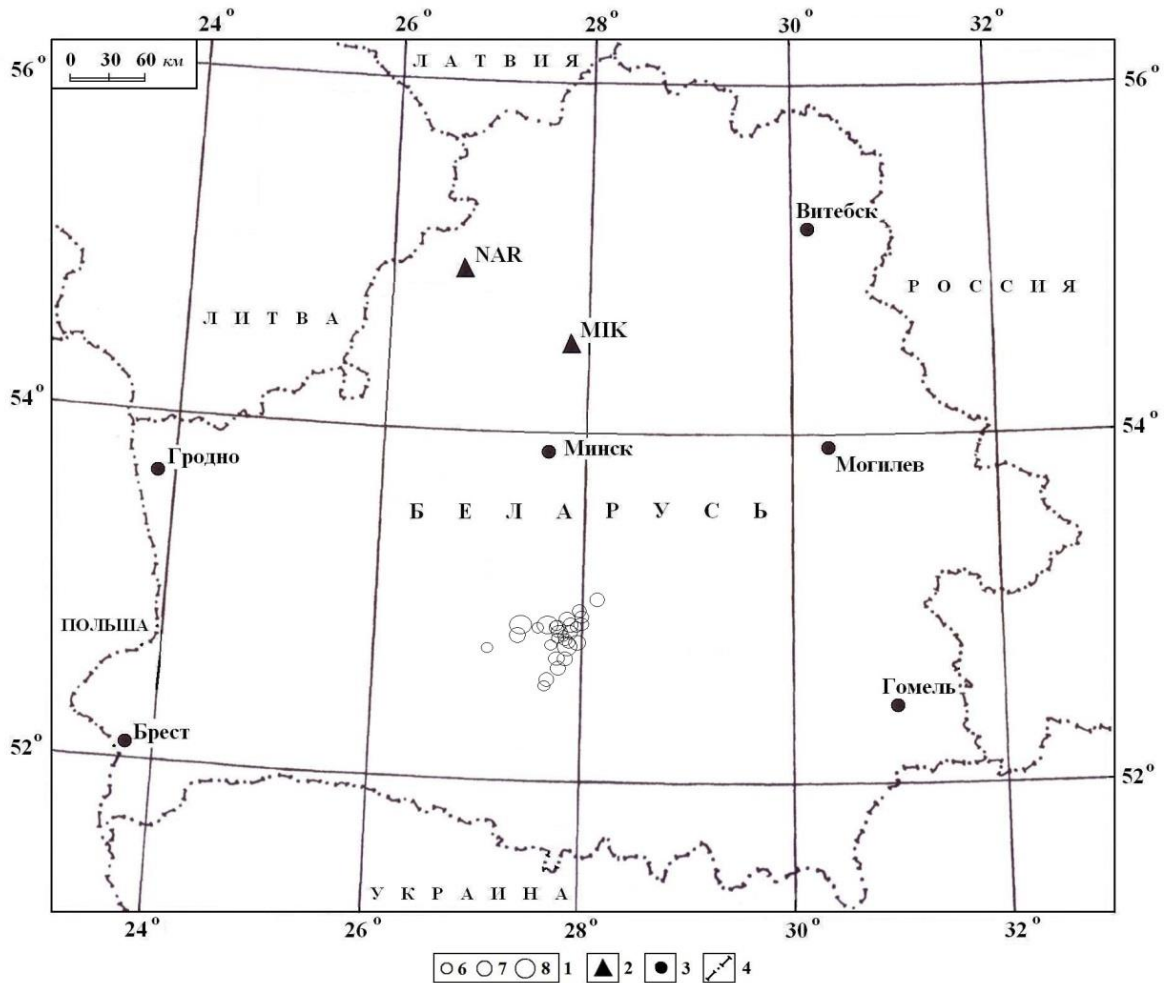
Условные обозначения: 1 – пункты наблюдений: геофизические обсерватории «Плещицы» – МИК и «Нарочь» – NAR; 2 – Солигорская локальная сейсмическая сеть; 3 – Островецкая локальная сейсмическая сеть; 4 – город; 5 – государственная граница

Рисунок 9.1 – Сеть пунктов наблюдений геофизического мониторинга

### Результаты наблюдений и оценка Сейсмический мониторинг

Первичная обработка полученной сейсмической информации заключается в определении моментов вступлений, знаков и четкости вступлений сейсмических волн; в измерении амплитуд и периодов сейсмических волн. Обработка сейсмической информации осуществляется в трех режимах: срочном (составление и подача сводки срочных донесений о сильном или ощутимом землетрясении в течение часа после регистрации события); оперативном (более полная обработка сейсмических событий за истекшие сутки); режиме станционной обработки данных с составлением ежедекадных бюллетеней.

На территории Беларуси в 2022 г. зарегистрировано 28 землетрясений энергетического диапазона  $K = 5,7-8,0$  или в единицах локальной магнитуды  $M = 0,9-2,2$ . Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с  $M = 2,2$  ( $K = 8,0$ ) произошло 7 декабря ( $03^h06^m$ ), а наименьшее с  $M = 0,9$  ( $K = 5,7$ ) произошло 28 октября ( $03^h23^m$ ). Основная часть сейсмических событий приурочена к зоне сочленения северо-западной части Припятского прогиба и Белорусской антеклизы, включая Солигорский горнопромышленный район и окружающую его территорию (рисунок 9.2).



1 – энергетический класс  $K=6-8$ ; 2 – сейсмическая станция; 3 – город; 4 – государственная граница

Рисунок 9.2 – Карта эпицентров землетрясений территории Беларуси, 2022 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило не равномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ( $0,1129 \cdot 10^9$  Дж) наблюдалось в январе, а минимальное значение ( $0,0005 \cdot 10^9$  Дж) отмечено в октябре. Максимальное число произошедших сейсмических событий (6) зафиксировано в январе и ноябре, а минимальное число событий (1) отмечено в марте-мае, сентябре-октябре и декабре.

В 2022 г. наблюдалось снижение (на 3,3841) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии ( $\Sigma E=0,3907 \cdot 10^9$  Дж) по сравнению с 2021 г. ( $\Sigma E=3,7748 \cdot 10^9$  Дж), и снижение (в 4,702) среднего многолетнего значения ( $\Sigma E=1,8370 \cdot 10^9$  Дж) за 29 лет (1993 – 2021 гг.). Количество произошедших сейсмических событий (28) меньше (на 42), чем 2021 г. (70), и меньше (в 1,851) среднего многолетнего значения ( $N_{\Sigma}=51,828$ ) за 29 лет.

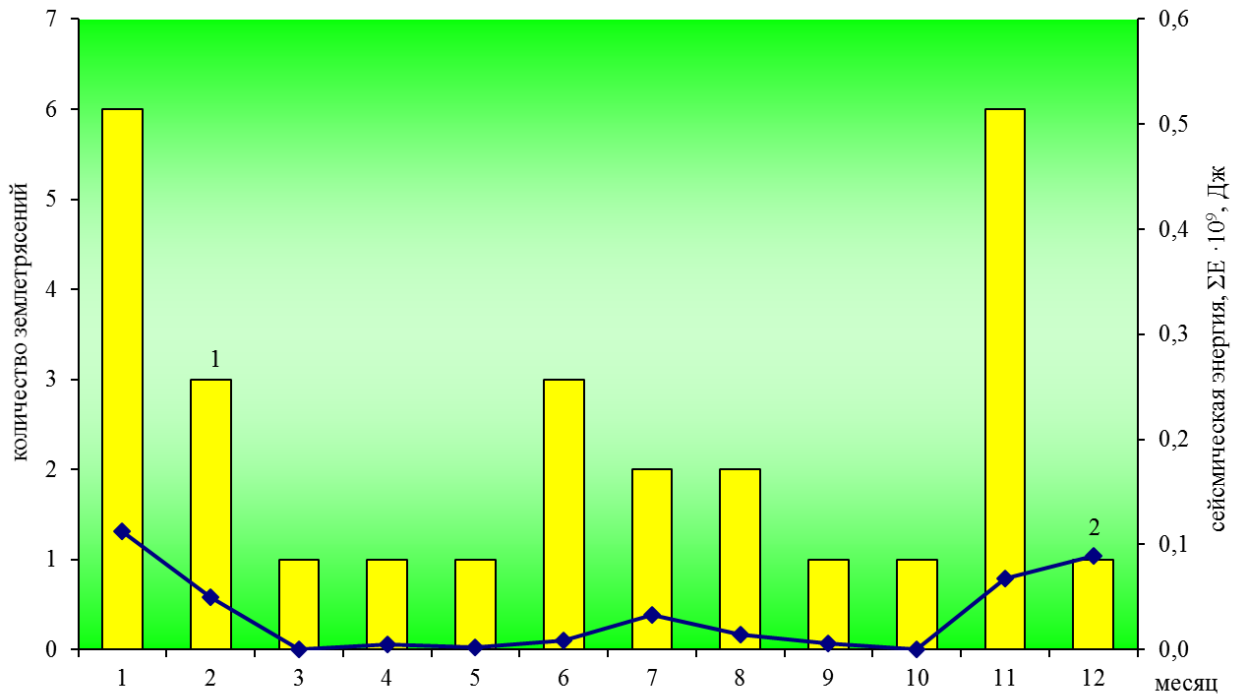


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2022 г.

На рисунке 9.4 представлено многолетнее распределение числа землетрясений и суммарной выделившейся сейсмической энергии по годам за период наблюдений 1993 – 2022 гг. Анализ долговременного проявления сейсмического процесса на территории Беларуси показал, что максимальные значения суммарной выделившейся сейсмической энергии наблюдались в 1996 и 1999 гг., минимальные отмечены в 2010 – 2012 гг. Максимальные числа произошедших сейсмических событий отмечены в 1997 – 1999, 2002 и 2015 гг. В 2022 г. произошло снижение выделившейся суммарной сейсмической энергии и количества произошедших сейсмических событий.

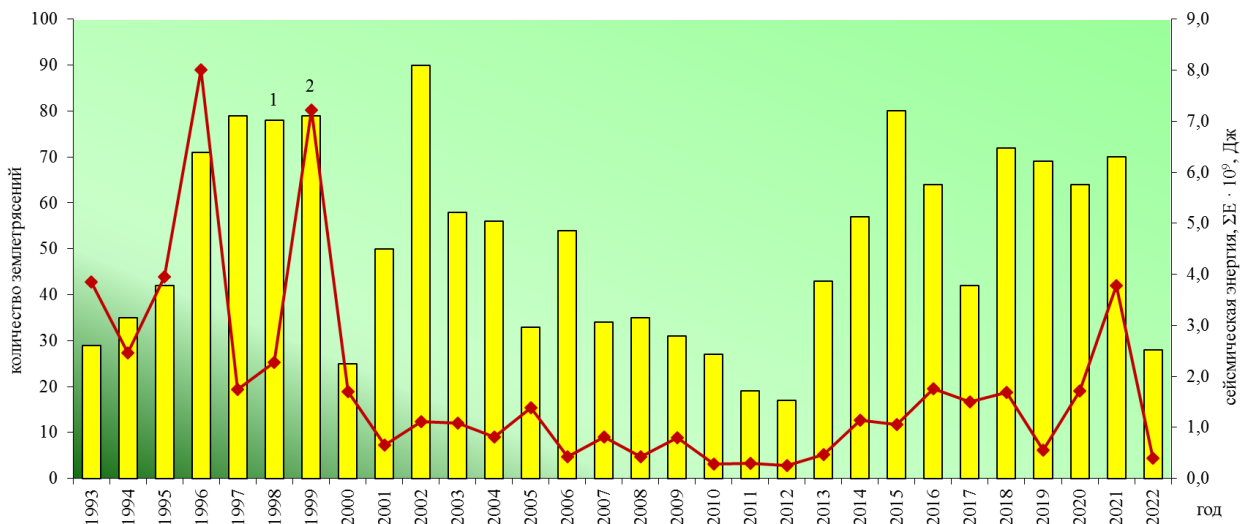


Рисунок 9.4 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993 – 2022 гг.

На рисунке 9.5 показана частота реализации всех сейсмических событий за 2022 г. в течение суток с периодами повышения числа событий в ночное время – 02<sup>h</sup> (5), в дневное время – 16<sup>h</sup> и 18<sup>h</sup> (2). Анализ частоты реализации сейсмических событий

в разные годы, не выявил четкого проявления максимумов числа событий в определенное время суток.

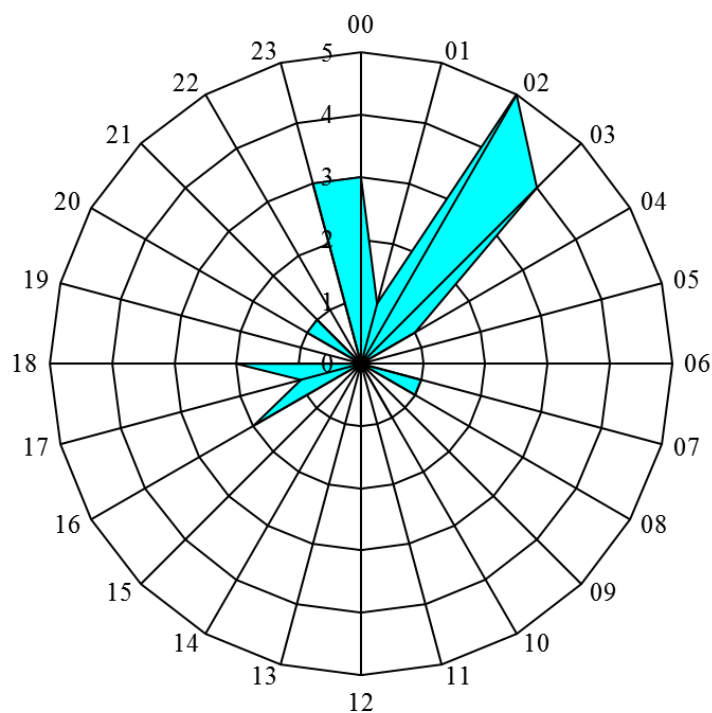


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2022 г. по часам суток

На рисунке 9.6 показано распределение всех землетрясений за 2022 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в среду (11), а минимум в понедельник (1). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявление максимума в определенный день.

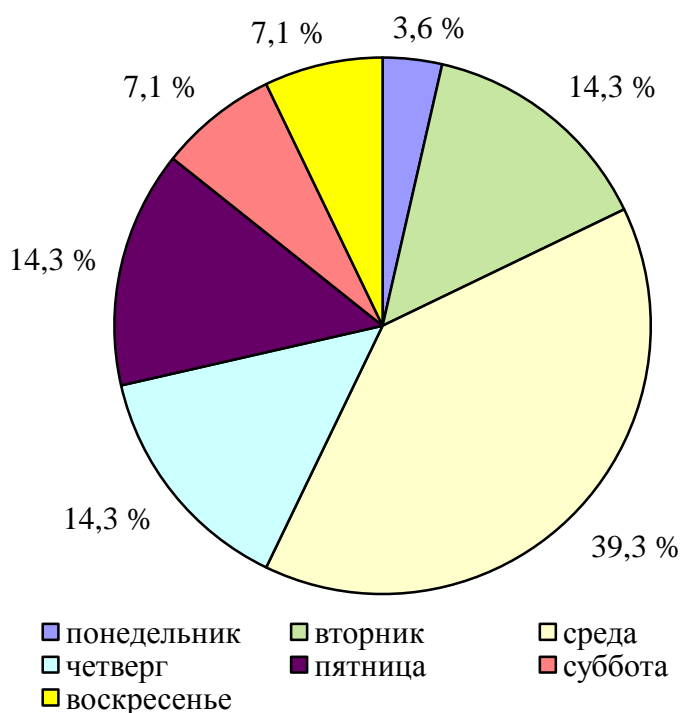


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2022 г.

**Геомагнитный мониторинг**

По данным вариационных наблюдений ежемесячно составлялся обзор состояния геомагнитного поля, включающий таблицы среднечасовых и среднесуточных значений элементов геомагнитного поля ( $H$  – горизонтальная составляющая,  $Z$  и  $D$  – угловое склонение), таблицы возмущенности геомагнитного поля по трехчасовым интервалам значений 9-балльной шкалы  $K$ -индексов, описания магнитных бурь и их характеристик. В 2022 г. выполнено 44 абсолютных измерений компонент  $D$ ,  $J$  (угловое склонение) и  $T$  (полный вектор напряженности магнитного поля) для определения базисных значений элементов геомагнитного поля  $D_0$ ,  $H_0$ ,  $Z_0$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$ .

В результате анализа и обобщения геомагнитных данных за 2022 г. составлены таблицы трехчасовых значений  $K$ -индексов по  $H$ ,  $D$  и  $Z$  компонентам геомагнитного поля. Проведено вычисление среднемесячных значений суммарных  $K$ -индексов. Распределение среднемесячных суммарных значений  $K$ -индексов в течение года проходило не равномерно (рисунок 9.7). Рост значений наблюдался в феврале–апреле, июле, сентябре и ноябре–декабре, снижение происходило в мае–июне, августе и октябре. Максимальное среднемесячное суммарное значение  $K$ -индексов отмечено в июле и декабре (20,2), а минимальное – в октябре (16,6). Среднегодовое значение (18,45) суммарных  $K$ -индексов за 2022 г. больше (на 3,28), чем в 2021 г. (15,17) и больше (в 1,05) среднего многолетнего значения (17,55) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

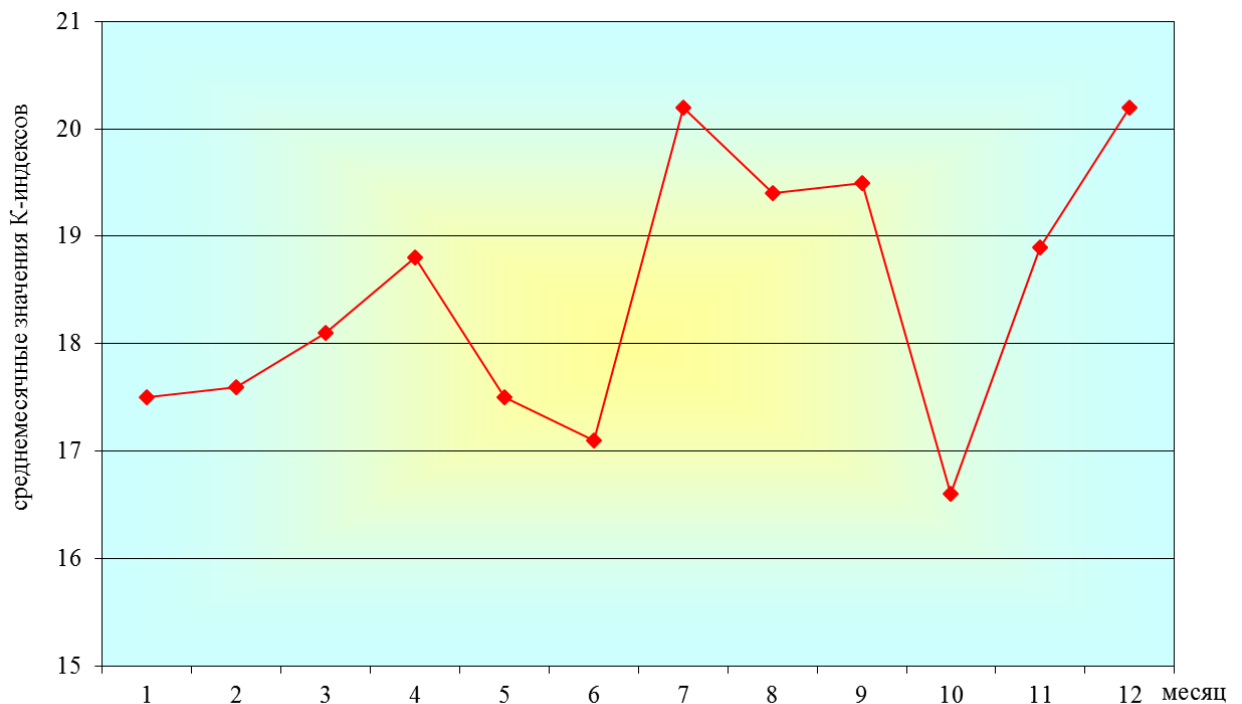


Рисунок 9.7 – График изменения среднемесячных значений суммарных  $K$ -индексов в 2022 г.

Долговременные вариации среднегодовых значений суммарных  $K$ -индексов показывают, что наблюдается три периода возрастания и снижения значений параметров (рисунок 9.8). Первый период наблюдался в 1997 – 2002 гг., второй в 2003 – 2009 гг., третий в 2010 – 2020 гг., с небольшой стабилизацией в 2019 году. В 2020 г. наблюдается снижение среднегодового значения до минимального, происходит завершение третьего периода солнечной активности. Максимальные значения среднегодовых значений суммарных  $K$ -индексов (24) наблюдались в 2000, 2004, 2005 гг., минимальные значения (13) отмечено в 2009 и 2020 гг. В 2021 – 2022 гг. наметился рост среднегодовых значений суммарных  $K$ -индексов, возможно, наступил следующий период активизации.

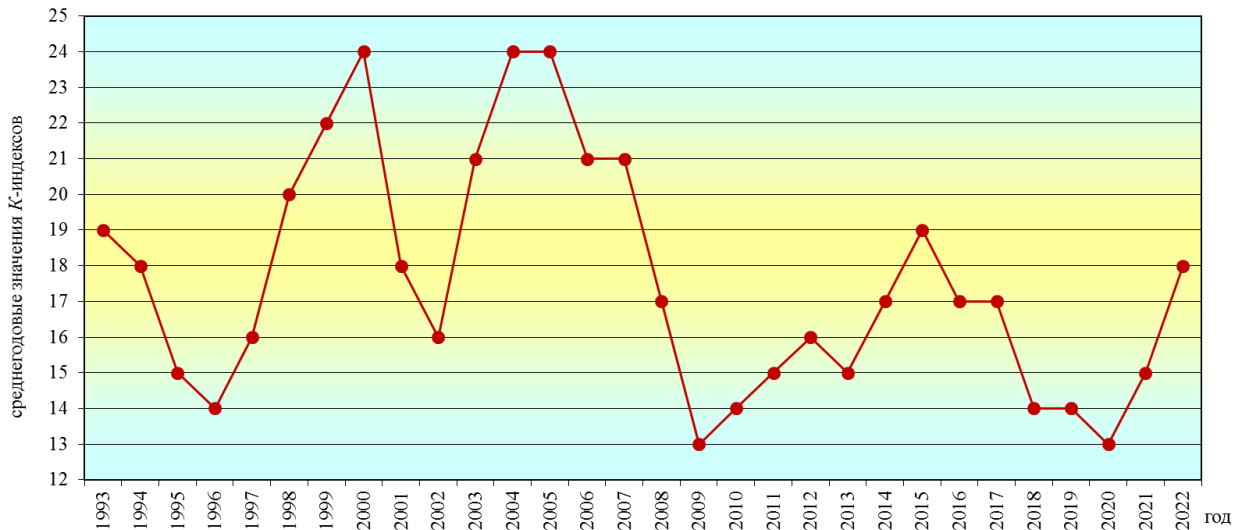


Рисунок 9.8 – График долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K-индексов за 1993 – 2022 гг.

В 2022 г. зафиксирована и обработана 61 магнитная буря. По типу магнитные бури определены как: 52 малые бури (M) и 9 умеренные (U).

На рисунке 9.9 показана основная панель управления прибора LEMI-022 с записью умеренной магнитной бури, произошедшей с 7 по 9 ноября 2022 г., продолжительность бури 54 часа.

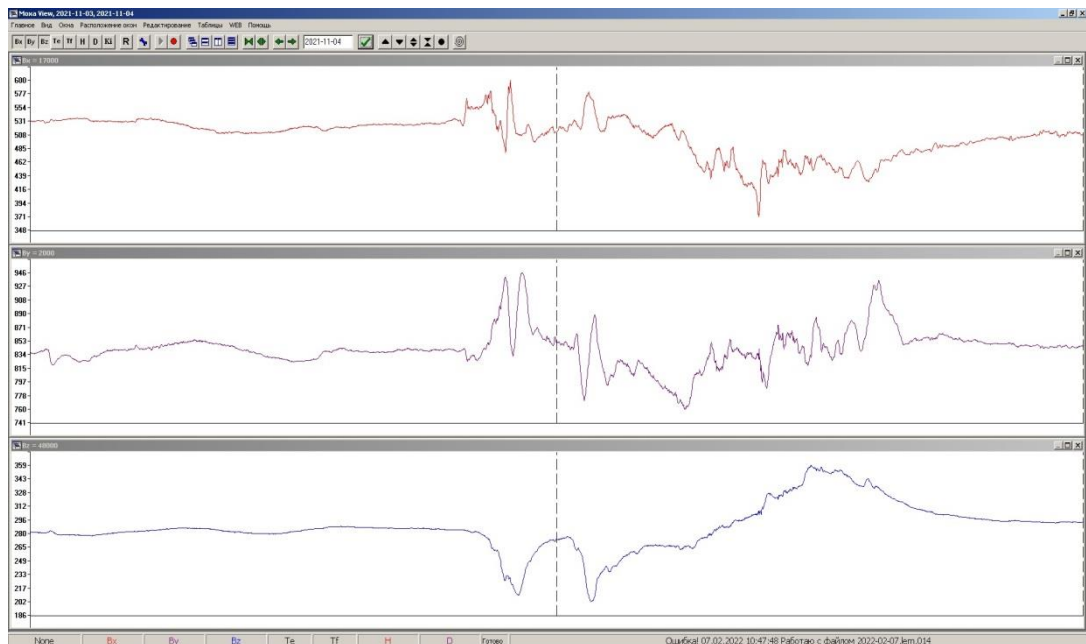


Рисунок 9.9 – Запись умеренной магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 7 сентября 2022 г. – 9 ноября 2022 г.

Наибольшее количество магнитных бурь (8) произошло в декабре, а наименьшее (3) в июне (рисунок 9.10). В 2022 г. произошло на 32 магнитные бури больше, чем в 2021 г. (29), и больше (в 2,298) среднего многолетнего значения (26,55) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).



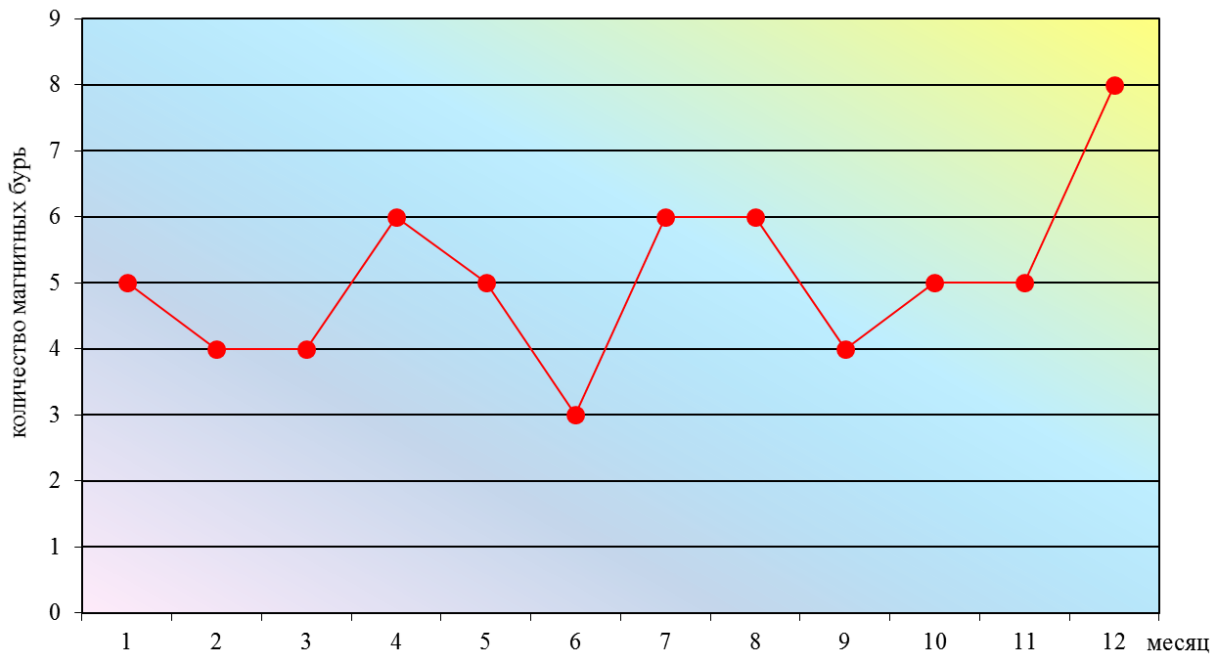


Рисунок 9.10 – График изменения числа магнитных бурь в 2022 г.

Долговременные вариации количества магнитных бурь показывают, что периоды снижения сменяются периодами возрастания значений параметра (рисунок 9.11). Так, в 1993 – 1998 гг. наблюдалось снижение значений, в 1999 – 2003 гг. отмечался рост значений с локальным понижением в 2004 г. и дальнейшим снижением до 2009 г. В 2010 – 2015 гг. наблюдался период возрастания, с небольшим понижением в 2013 – 2014 гг. Затем в 2016 – 2020 гг. наблюдается спад значений. Максимальные значения количества магнитных бурь наблюдались в 2003 г. (50) и 2015 г. (54), а минимальное значение (2) отмечено в 2009 г. Период между максимальными пиками по количеству бурь составляет 12 лет, который совпадает с очередным периодом солнечной активности. В 2022 г. наблюдался резкий рост количества магнитных бурь, которое достигло максимального значения за период наблюдений 1993 – 2021 гг. Следовательно, продолжилась активизация возмущений магнитного поля Земли, которая связана с очередным периодом солнечной активности.

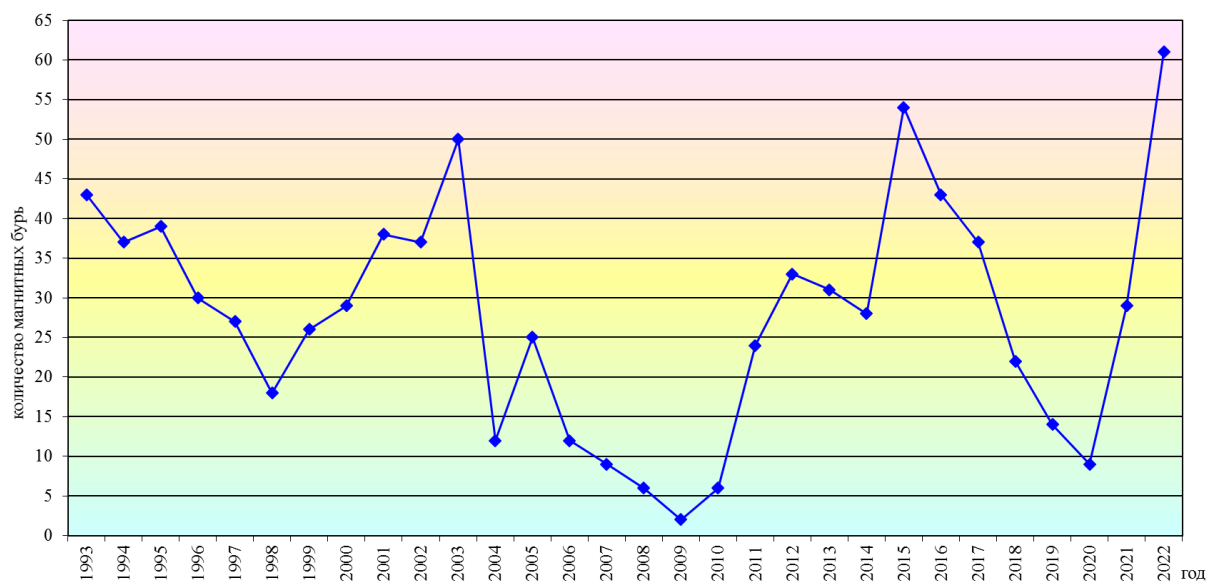


Рисунок 9.11 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993 – 2022 гг.

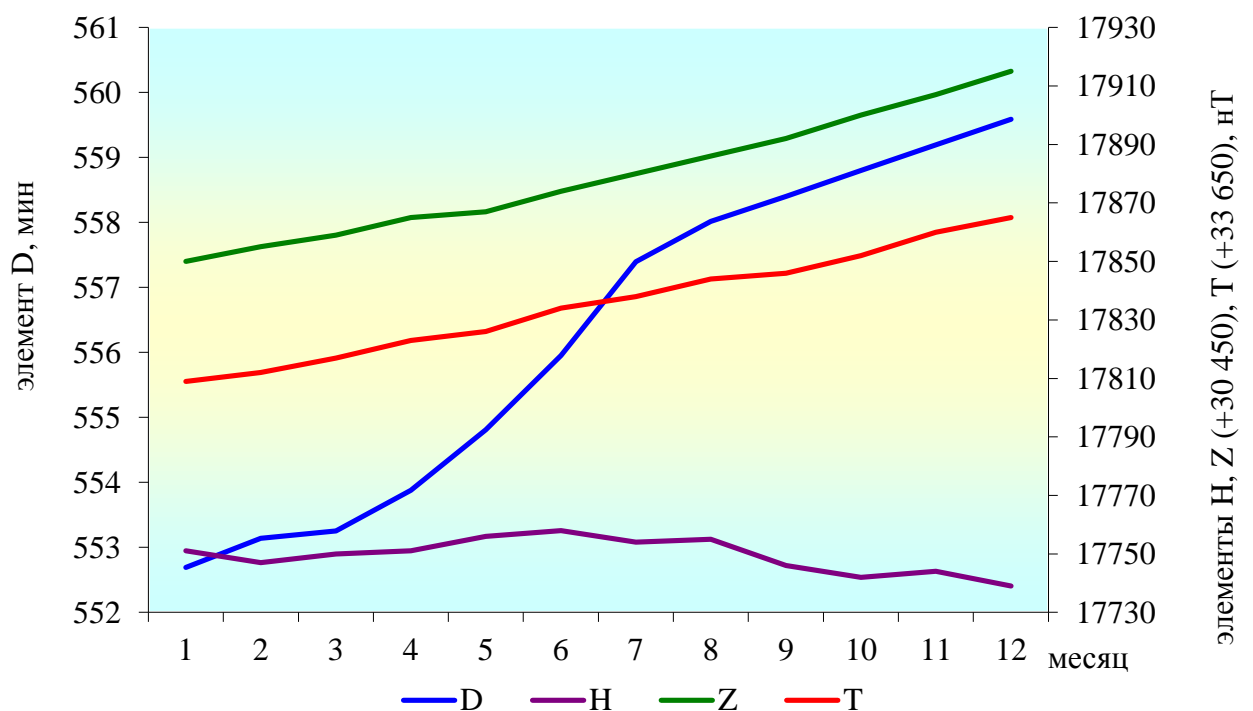


Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2022 г. составлен по изменению среднемесячных значений элементов  $D$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $T$ . На протяжении всего года отмечался рост значений элемента  $D$  (угловая составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в марте (рисунок 9.12). Максимальное значение (559,590 нТл) элемента  $D$  отмечено в декабре, а минимальное – в январе (552,690 нТл). Среднегодовое значение (556,260 нТл) элемента  $D$  больше (на 114,461 нТл) среднего многолетнего значения (441,799 нТл) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

Распределение значений элемента  $H$  (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило не равномерно (рисунок 9.12). Снижение отмечено в феврале, июле, сентябре-октябре и декабре, а рост значений наблюдался в марте-июне, августе и ноябре. Максимальное значение (17758 нТл) зафиксировано в июне, а минимальное – в декабре (17739 нТл). Среднегодовое значение (17749 нТл) элемента  $H$  меньше (на 31,836 нТл) среднего многолетнего значения (17780,836 нТл) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

На протяжении всего года отмечался рост значений элемента  $Z$  (вертикальная составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в мае (рисунок 9.12). Максимальное значение (48365 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (48300 нТл). Среднегодовое значение (48329 нТл) элемента  $Z$  больше (на 726,595 нТл) среднего многолетнего значения (47602,405 нТл) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

В течение года увеличивалось значение элемента  $T$  (полный вектор напряженности магнитного поля Земли) с небольшим замедлением роста в мае и сентябре (рисунок 9.12). Максимальное значение (51515 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (51459 нТл). Среднегодовое значение (51485 нТл) элемента  $T$  больше (на 670,037 нТл) среднего многолетнего значения (50814,963 нТл) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

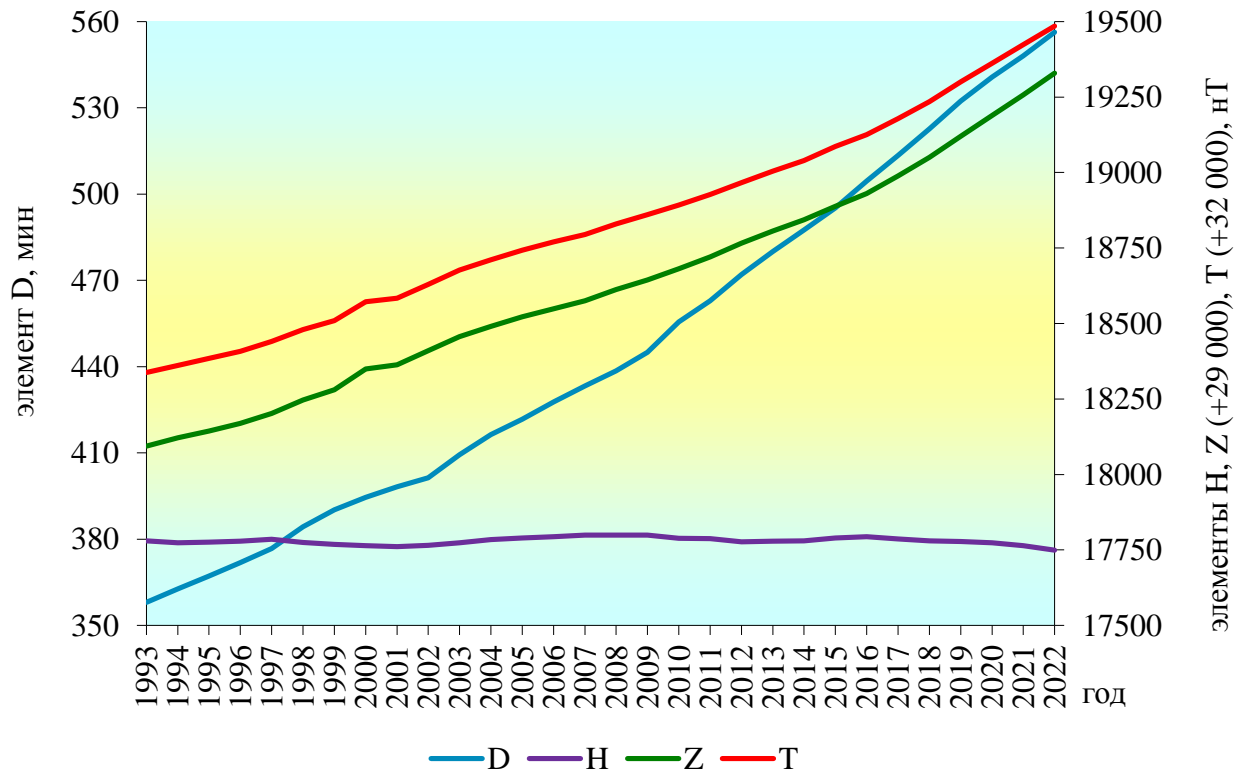


Условные обозначения:  $D$  – угловая составляющая магнитного поля,  $H$  – горизонтальная составляющая магнитного поля,  $Z$  – вертикальная составляющая магнитного поля,  $T$  – полный вектор напряженности магнитного поля Земли

Рисунок 9.12 – График изменения среднемесячных значений элементов  $D$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $T$  в 2022 г.

Вековой ход среднегодовых значений элементов геомагнитного поля Земли, определяемый по данным геомагнитной обсерватории «Минск», вычислен, как разность

среднегодовых значений элементов геомагнитного поля между последующим и предыдущим годами. На рисунке 9.13 показан годовой ход элементов  $D$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $T$  геомагнитного поля Земли на геомагнитной обсерватории «Минск» (Плещеницы) за период 1993 – 2022 гг. Вековой ход склонения  $D$  геомагнитного поля за период наблюдений составил в среднем (6,610) в год. Вековой ход вертикальной составляющей  $Z$  составляет (41,167 нТл) в год, а полного вектора  $T$  геомагнитного поля (38,233 нТл) в год. Вековой ход горизонтальной составляющей  $H$  геомагнитного поля составляет в среднем (-1,033 нТл), вековой ход колеблется возле среднего многолетнего значения (17780 нТл). Рост значений векового хода наблюдаемых элементов  $D$ ,  $Z$ ,  $T$  геомагнитного поля указывает на продолжающееся смещение магнитного полюса Земли.



Условные обозначения:  $D$  – угловая составляющая магнитного поля,  $H$  – горизонтальная составляющая магнитного поля,  $Z$  – вертикальная составляющая магнитного поля,  $T$  – полный вектор напряженности магнитного поля Земли

Рисунок 9.13 – Годовой ход составляющих  $D$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $T$  геомагнитного поля Земли за период 1993 – 2022 гг.

### Международное сравнение

*Глобальный сейсмологический мониторинг.* В 2022 г. сетью сейсмических станций Беларуси зарегистрировано и обработано 3263 землетрясения в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 145 землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,0$ , в том числе 11 событий с  $M \geq 7,0$ . Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне  $mb=7,0$  и по поверхностной волне  $M_s = 7,8$  произошло 19 сентября (18<sup>h</sup>05<sup>m</sup>) на побережье Мичоакана, Мексика. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2022 г. географическое распределение эпицентров землетрясений Земли в основном соответствует известной мировой статистике наблюдаемых на земном шаре землетрясений. В основном такие землетрясения приурочены к областям высокой современной тектонической активности и связаны с конвергентными или дивергентными границами литосферных плит, где происходит либо сжатие, поглощение океанской коры в зонах субдукции, либо растяжение континентальной коры. В этих регионах непрерывно

накапливаются тектонические напряжения, которые периодически разряжаются в виде землетрясений. Большая часть всей сейсмической энергии за год выделилась в Тихоокеанском сейсмоактивном поясе, остальная энергия землетрясений приходится на Трансазиатский, Атлантический и Индийский сейсмические пояса и другие сейсмоактивные регионы Земли.

В 2022 г. наибольшее число землетрясений (372) зафиксировано в сентябре, а наименьшее (231) в декабре (рисунок 9.14). Количество произошедших землетрясений (3263) больше (на 194), чем в 2021 г. (3069), и больше (в 2,093) среднего многолетнего значения (1559,034) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

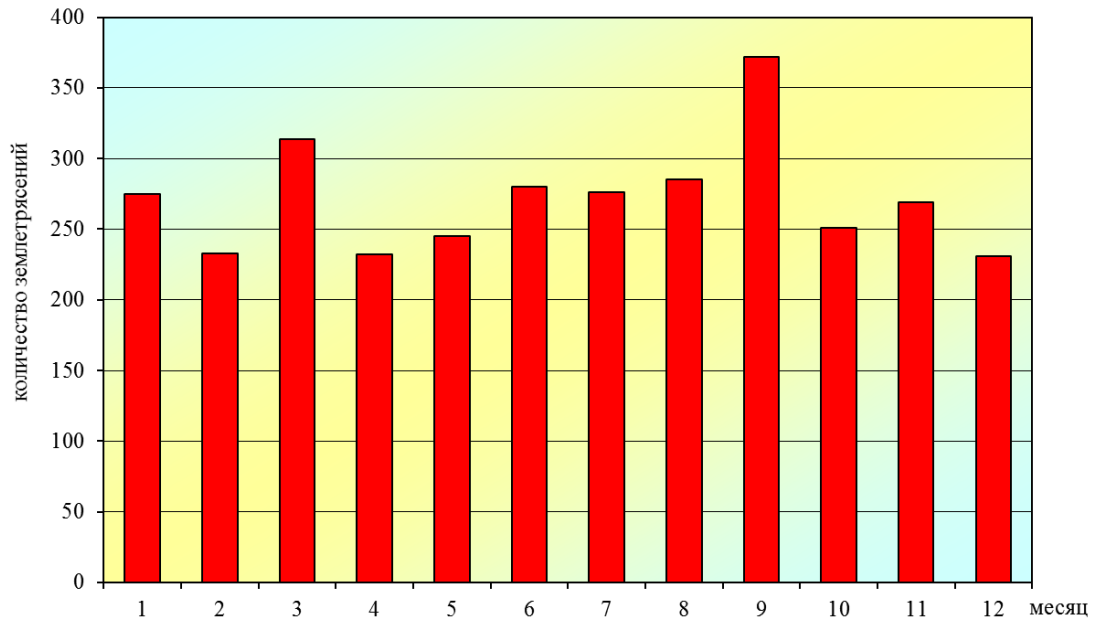


Рисунок 9.14 – График изменения количества землетрясений Земли в 2022 г.

На рисунке 9.15 представлен долговременный график количества землетрясений по годам за период с 1993 по 2022 гг. Наблюдались 3 активных периода: в 1993 – 1996 гг. с максимумом землетрясений в 1995 г. (1450); в 2005 – 2011 гг. – 2005 г. (1674); в 2015 – 2022 гг. – 2022 г. (3263). Минимальное число землетрясений наблюдалось в 1998 г. (854), 2001 г. (886) и 2003 г. (895).

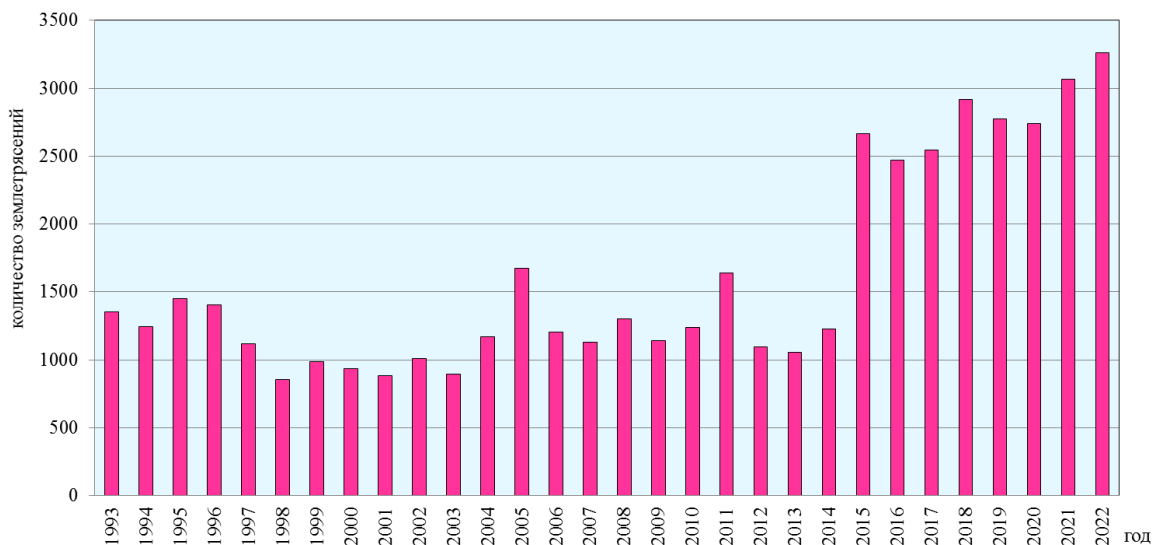


Рисунок 9.15 – График изменения во времени количества землетрясений Земли за 1993 – 2022 гг.

*Региональный сейсмологический мониторинг.* На территории Европы и смежных областях в 2022 г. зарегистрировано 875 землетрясений с магнитудой  $M \geq 3,0$ , из них 45 событий с  $M \geq 5,0$ . Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне  $m_b = 5,9$  и с магнитудой по поверхностной волне  $M_s = 5,8$  произошло 22 апреля (21<sup>h</sup>07<sup>m</sup>) в Боснии и Герцеговине. На Европейском субконтиненте наибольшая плотность эпицентров землетрясений наблюдалась в Альпийском сейсмоактивном поясе. В пределах этого пояса выделилась основная часть суммарной сейсмической энергии за год, остальная ее часть относится к внутриконтинентальной и океанической частям.

В течение года наибольшее количество землетрясений (94) произошло в апреле, а наименьшее (53) в июне (рисунок 9.16). В 2022 г. отмечено (на 121) землетрясение меньше, чем в 2021 г. (996) и больше (в 1,439) среднего многолетнего значения (608,276) за 29 лет (1993 – 2021 гг.).

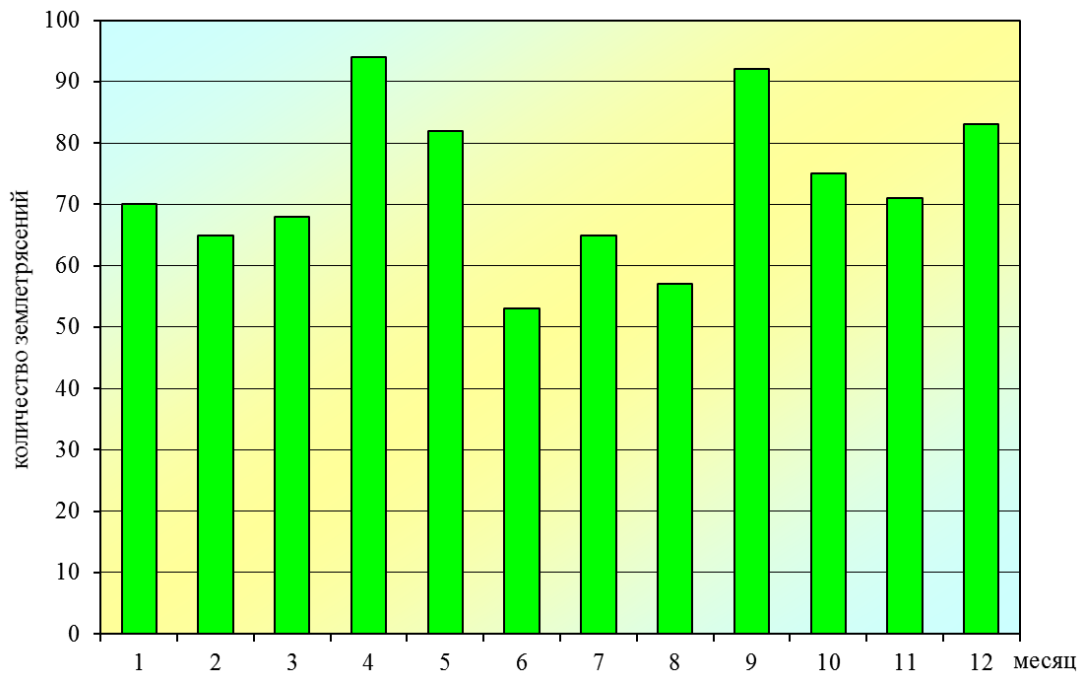


Рисунок 9.16 – График изменения количества землетрясений Европы и смежных областей в 2022 г.

На рисунке 9.17 представлен долговременный график хода количества землетрясений на территории Европы и смежных областях с магнитудами  $M \geq 3,0$  за период 1993 – 2022 гг. Анализ долговременного проявления сейсмического процесса показал, что тенденция нарастания числа землетрясений с 1993 г. достигла своего максимума в 2006 г., а в 2007 – 2008 гг. отмечался стабильный ход. В 2009 – 2010 гг. наблюдался спад активности, который прервался в 2011 – 2012 гг., а 2013 – 2014 гг. наметился спад активности. В 2015 г. наблюдается резкий рост значений, в связи с афтершоковой активностью от сильных землетрясений, в 2016 – 2018 гг. отмечался постепенный спад активности. В 2019 – 2020 гг. отмечается рост числа землетрясений, а в 2021 – 2022 гг. произошел спад активности.

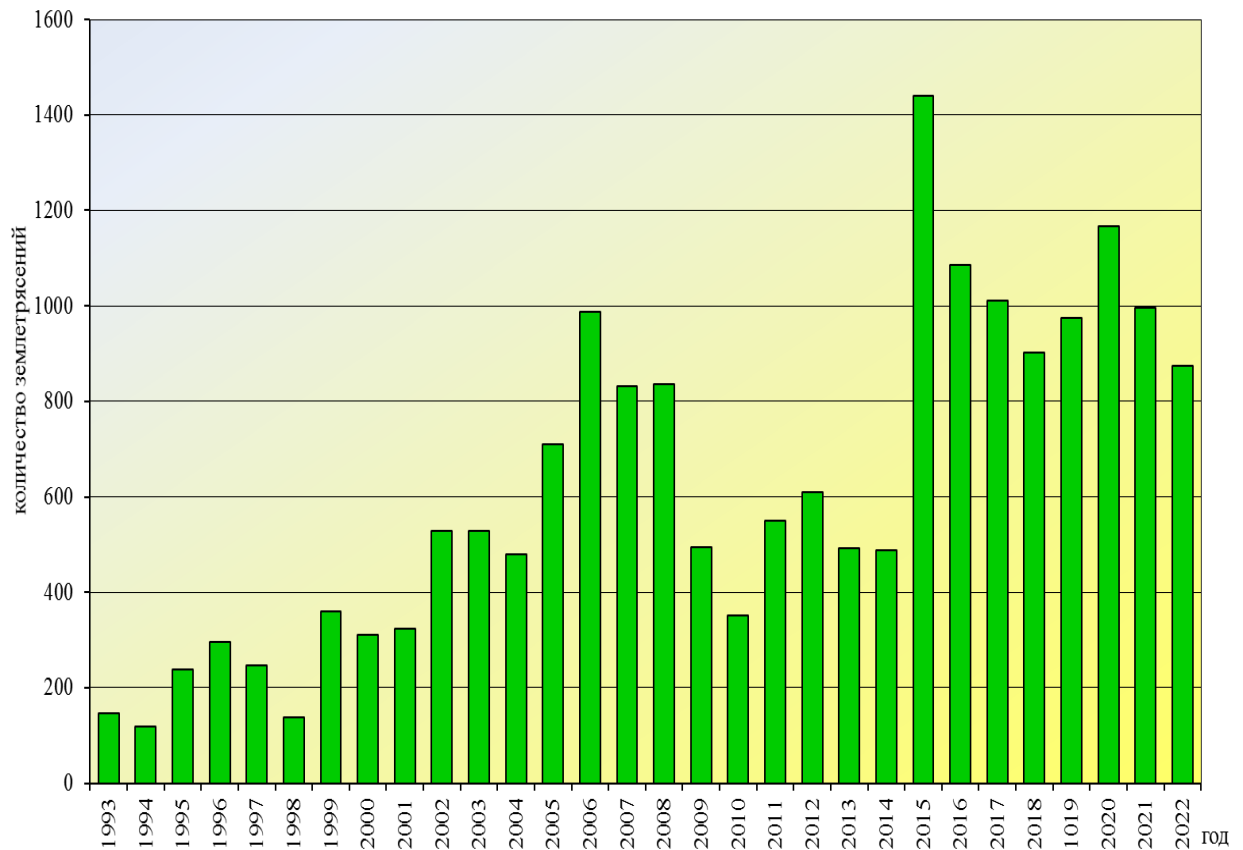


Рисунок 9.17 – График изменения во времени количества землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой  $M \geq 3,0$  за 1993 – 2022 гг.

*Комплексный анализ параметров сейсмичности.* На основе анализа и обобщения сейсмологического мониторинга территории Земли, Европы и Беларуси выполнен комплексный анализ параметров сейсмичности за период 1993 – 2022 гг. (рисунок 9.18).

Анализ сейсмичности показал, что на территории Земли максимальное число землетрясений (3263) зафиксировано в 2022 г., а минимальное (854) в 1998 г. На территории Европы и смежных областях максимальное число землетрясений (1439) зафиксировано в 2015 г., а минимальное (118) в 1994 г. В Беларуси максимальное число землетрясений (90) зафиксировано в 2002 г., а минимальное (17) в 2012 г.

Комплексный анализ сейсмичности показал, что процесс высвобождения сейсмической энергии не стабилен, периоды роста числа событий изменяются на их снижение и наоборот. В отдельные годы наблюдается синхронный ход высвобождения энергии, а в другие отмечается развитие процесса в противофазе. В 2022 г. наблюдается небольшой рост числа зафиксированных землетрясений на территории Земли, снижение отмечается в Европе и Беларуси.

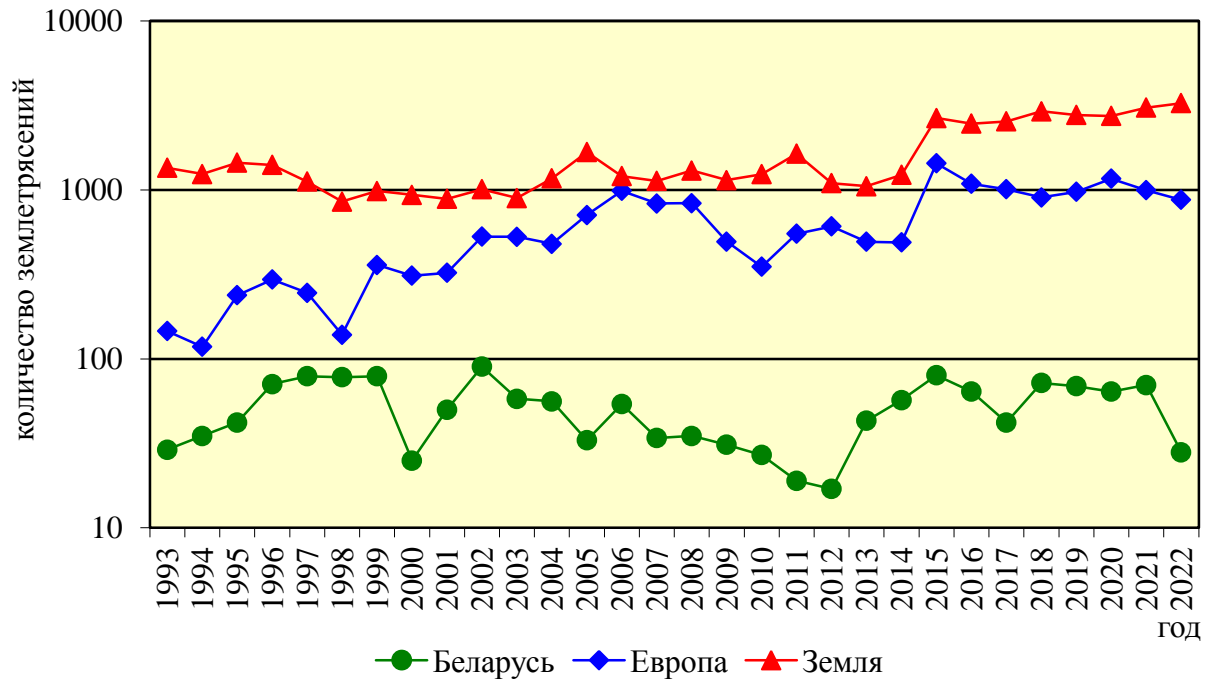


Рисунок 9.18 – График временного хода числа землетрясений на территории Земли, Европы и Беларуси за период 1993 – 2022 гг.

### Прогноз

Территория Беларуси расположена на западе древней Восточно-Европейской платформы и, в соответствии с сеймотектоническим районированием, относится к слабоактивному региону. Проведение многолетних сейсмологических наблюдений показало, что сейсмическая энергия на территории Беларуси высвобождается землетрясениями невысокого магнитудного уровня. Уровень сейсмической активности в дальнейшем прогнозируется в пределах среднего многолетнего значения с небольшими отклонениями.

Обзор состояния геомагнитного поля Земли за многолетний период дает основание полагать, что рост значений векового хода наблюдаемых элементов  $D$ ,  $Z$ ,  $T$  геомагнитного поля продолжится и в последующем до момента инверсии магнитных полюсов Земли. Величину изменения этих параметров сложно спрогнозировать из-за сложности процессов, влияющих на магнитное поле Земли: ускорение движения северного магнитного полюса, изменение солнечной активности и другие факторы, влияющие на состояние магнитного поля Земли.