

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 [44, 45].

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:

сейсмические наблюдения, представляющие собой систему непрерывных круглосуточных наблюдений за происходящими сейсмическими событиями естественного и искусственного происхождения в широком диапазоне энергий и расстояний;

геомагнитные наблюдения, включающие непрерывные стационарные наблюдения за текущим состоянием геомагнитного поля и периодические наблюдения за геодинамическими процессами на полигонах.

Сейсмологические наблюдения 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 наблюдения 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.

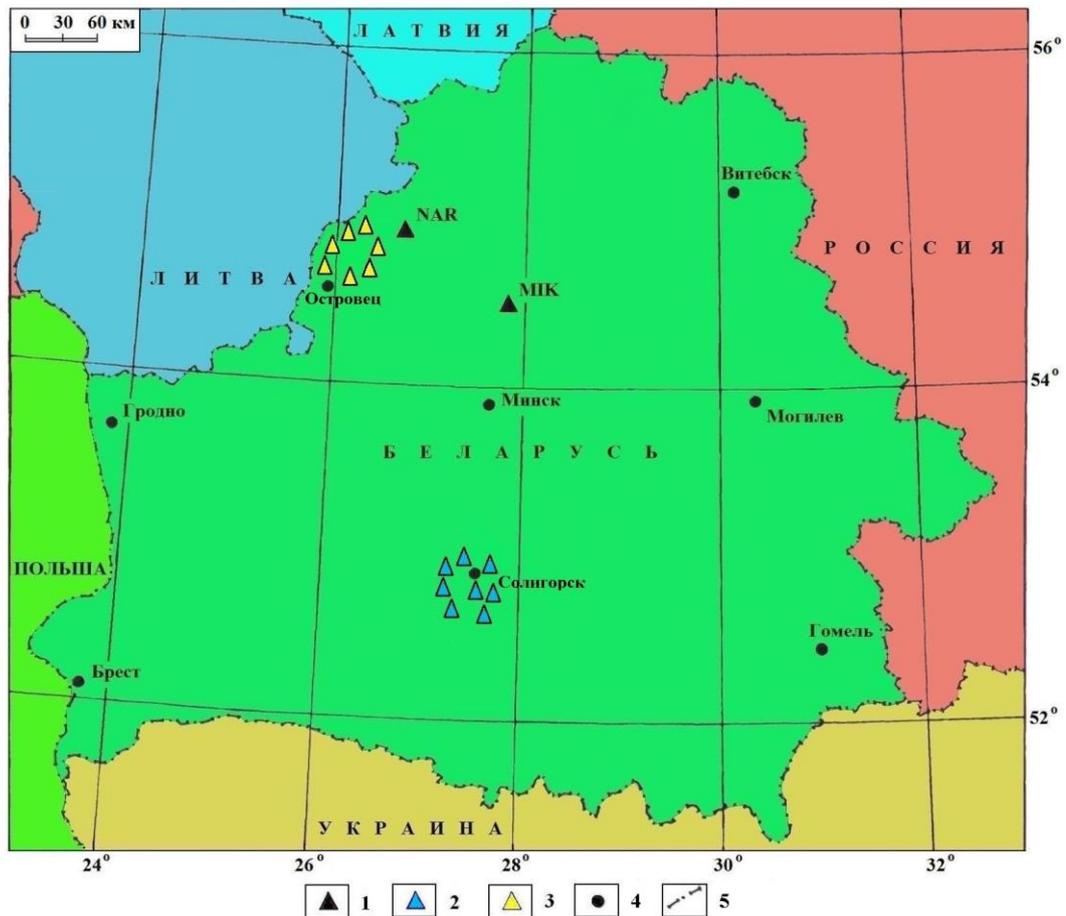
Сеть геофизического мониторинга Республики Беларусь структурно состоит из трех уровней: глобальный, региональный и локальный. Глобальный и региональные уровни мониторинга обеспечивают геофизические обсерватории «Плещеницы» и «Нарочь»; региональный и локальный – сети сейсмических станций в Солигорском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

В 2023 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», «Кобацевичи», «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 2023 г. на глобальном уровне составляет 3463 событий, на региональном – 1269 и локальном – 54 землетрясений. Анализ сейсмичности показал, что уровень сейсмической активности в 2023 г. повысился по отношению к 2022 г. и остается повышенным по отношению к средним многолетним значениям на глобальном, региональном и локальном уровнях.

В 2023 г. геомагнитной обсерваторией зафиксировано 50 магнитных бурь, среднегодовое значение суммарных K -индексов составляет 18,98. Определены среднегодовые значения векового хода элементов D (563,59), H (17744), Z (48395), T (51545) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли в 2023 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» – МІК и «Нарочь» – NAR; 2 – Солигорская локальная сейсмическая сеть; 3 – Островецкая локальная сейсмическая сеть; 4 – город; 5 – государственная граница

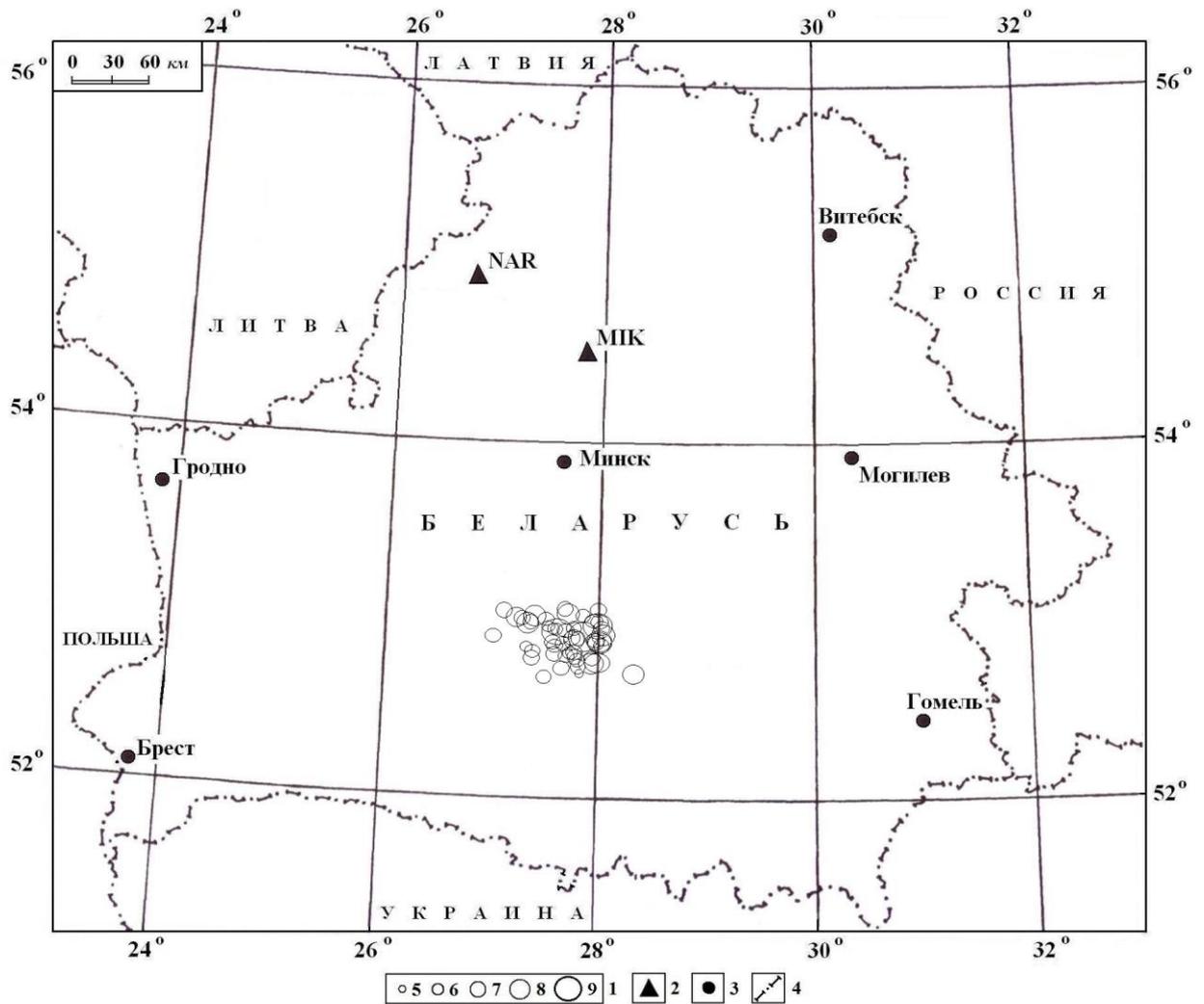
Рисунок 9.1 – Сеть пунктов наблюдений геофизического мониторинга

Результаты наблюдений и оценка

Сейсмические наблюдения

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 Республики Беларусь в 2023 г. зарегистрировано 54 землетрясения энергетического диапазона $K=5,5-9,1$ или в единицах локальной магнитуды $M=0,8-2,8$. Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с $M=2,8$ ($K=9,1$) произошло 24 августа (01^h46^m), а наименьшее с $M=0,8$ ($K=5,5$) произошло 20 апреля (23^h34^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 $K=5-9$; 2 – сейсмическая станция; 3 – город; 4 – государственная граница

Рисунок 9.2 – Карта эпицентров землетрясений территории Республики Беларусь, 2023 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило неравномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ($2,1231 \cdot 10^9$ Дж) наблюдалось в августе, а минимальное значение ($0,0070 \cdot 10^9$ Дж) отмечено в апреле. Максимальное число произошедших сейсмических событий (8) зафиксировано в августе, а минимальное число событий (2) отмечено в марте и мае.

В 2023 г. наблюдалось увеличение (на 3,663) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии ($\Sigma E=4,0537 \cdot 10^9$ Дж) по сравнению с 2022 г. ($\Sigma E=0,3907 \cdot 10^9$ Дж), и увеличение (в 2,266) среднего многолетнего значения ($\Sigma E=1,7888 \cdot 10^9$ Дж) за 30 лет (1993 – 2022 гг.). Количество произошедших сейсмических событий (54) больше (на 26), чем 2022 г. (28), и больше (в 1,058) среднего многолетнего значения ($N_{\Sigma}=51,033$) за 30 лет.

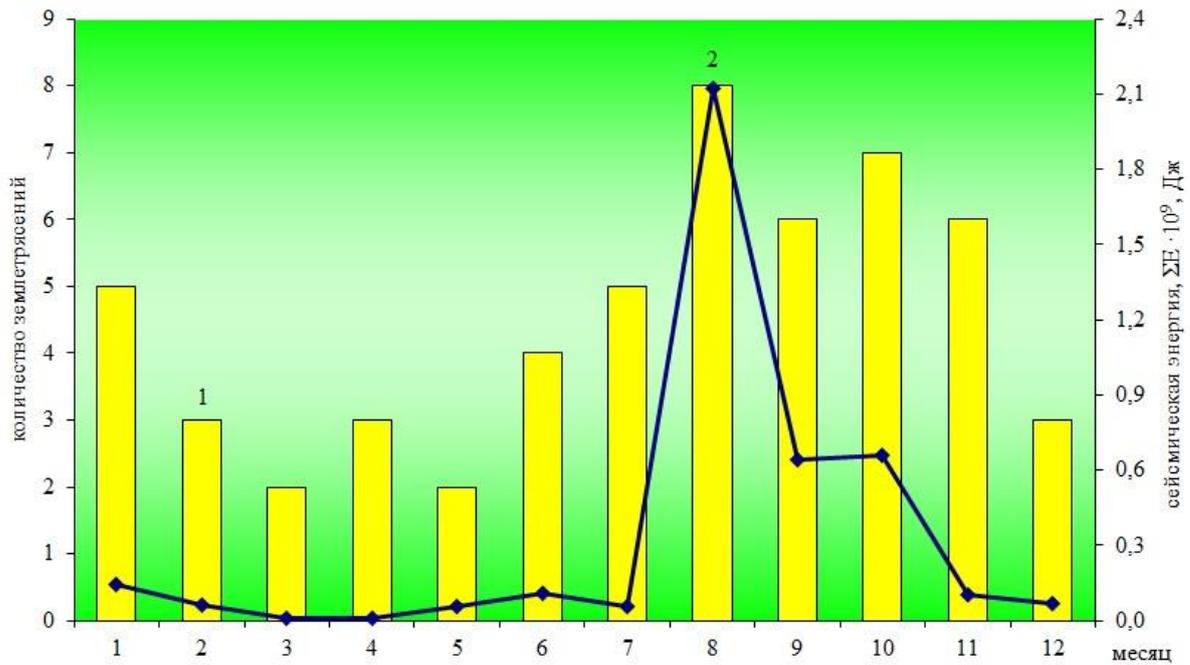


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2023 г.

На рисунке 9.4 представлено многолетнее распределение числа землетрясений и суммарной выделившейся сейсмической энергии по годам за период наблюдений 1993 – 2023 гг. Анализ долговременного проявления сейсмического процесса на территории Республики Беларусь 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 2023 г. произошло увеличение выделившейся суммарной сейсмической энергии и количества произошедших сейсмических событий.

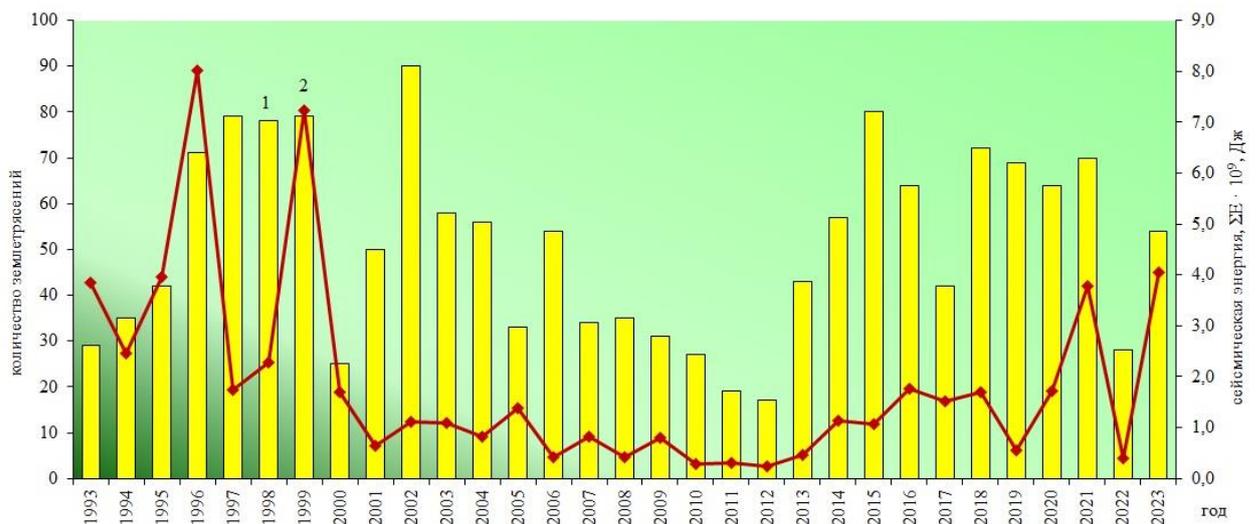


Рисунок 9.4 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993 – 2023 г.

На рисунке 9.5 показана частота реализации всех сейсмических событий за 2023 г. в течение суток с периодами повышения числа событий в ночное время – 02^h (7), в дневное время – 15^h (4). Анализ частоты реализации сейсмических событий в разные

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

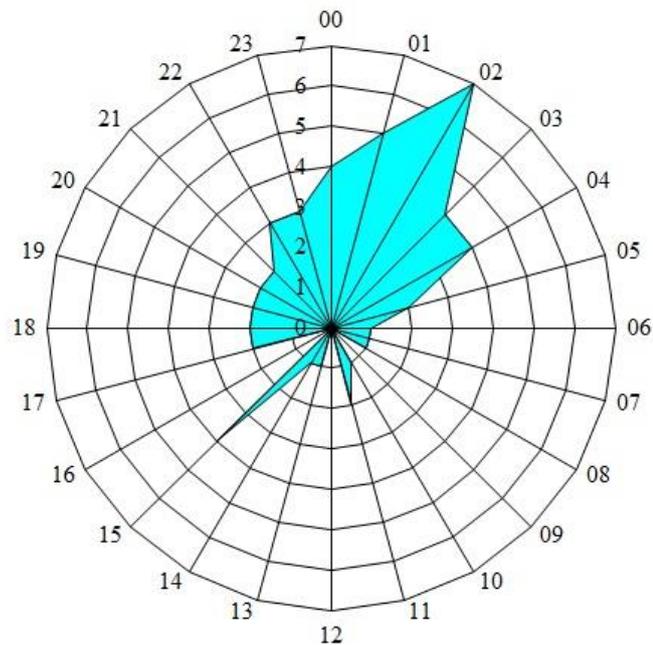


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2023 г. по часам суток

На рисунке 9.6 показано распределение всех землетрясений за 2023 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в четверг (15), а минимум в воскресенье (4). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявление максимума в определенный день.

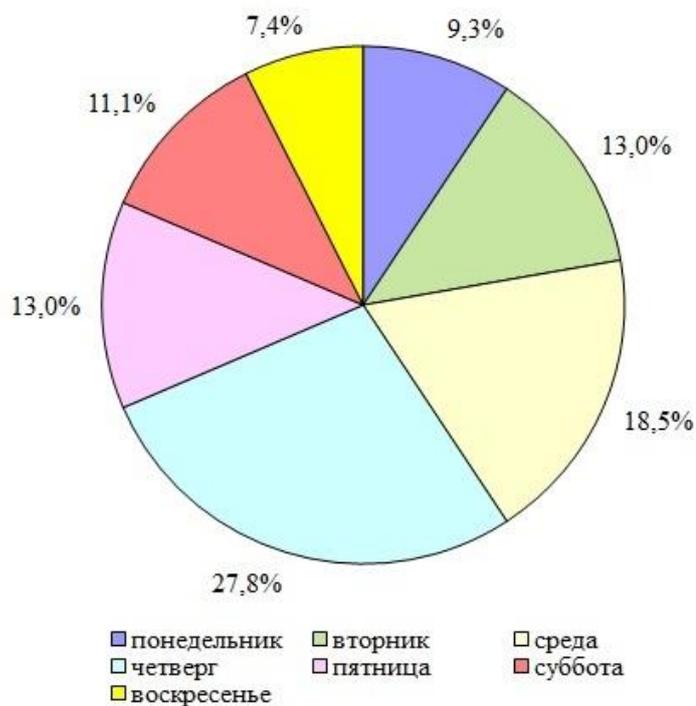


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2023 г.

Геомагнитные наблюдения

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 2023 г. выполнено 79 абсолютных измерений компонент D , J (угловое наклонение) 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 2023 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 неравномерно (рисунок 9.7). Рост значений наблюдался в феврале-марте, июне, сентябре и ноябре, снижение происходило в апреле-мае, июле-августе, октябре и декабре. Максимальное среднемесячное суммарное значение K -индексов отмечено в сентябре (21,9), а минимальное – в декабре (15,4). Среднегодовое значение (18,98) суммарных K -индексов за 2023 г. больше (на 0,53), чем в 2022 г. (18,45) и больше (в 1,08) среднего многолетнего значения (17,57) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

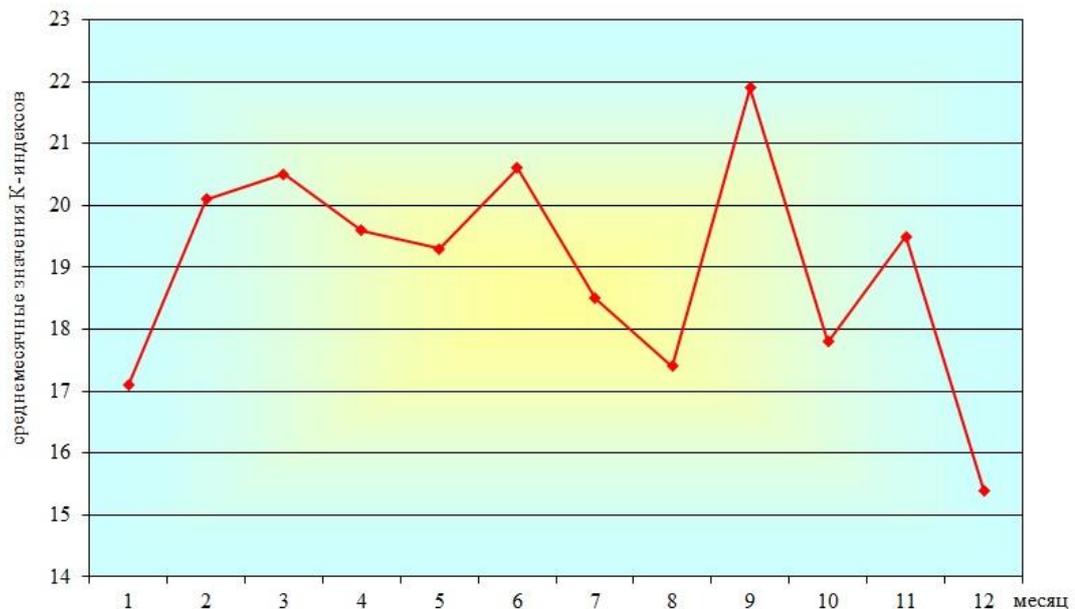


Рисунок 9.7 – График изменения среднемесячных значений суммарных K -индексов в 2023 г.

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 г. В 2020 г. наблюдается снижение среднегодового значения до минимального, происходит завершение третьего периода солнечной активности. Очередной период роста значений начал формироваться с 2021 г. В 2023 г. продолжился рост значений. 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 – 2023 гг. отмечается рост среднегодовых значений суммарных K -индексов, происходит формирование следующего периода активизации.

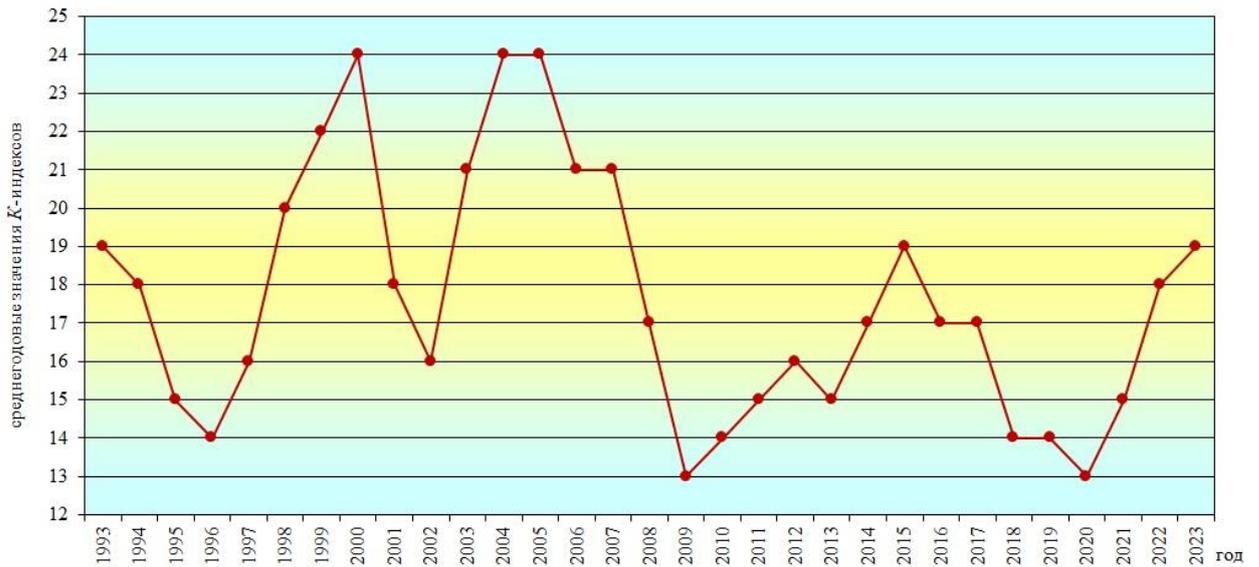


Рисунок 9.8 – График долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K-индексов за 1993 – 2023 гг.

В 2023 г. зафиксировано и обработано 50 магнитных бурь. По типу магнитные бури определены как: 39 малые (M), 7 умеренные (У), 2 большие и 2 очень большие.

На рисунке 9.9 показана основная панель управления прибора LEMI-022 с записью очень большой магнитной бури, произошедшей с 5 по 6 ноября 2023 г., продолжительность бури 28 часов.

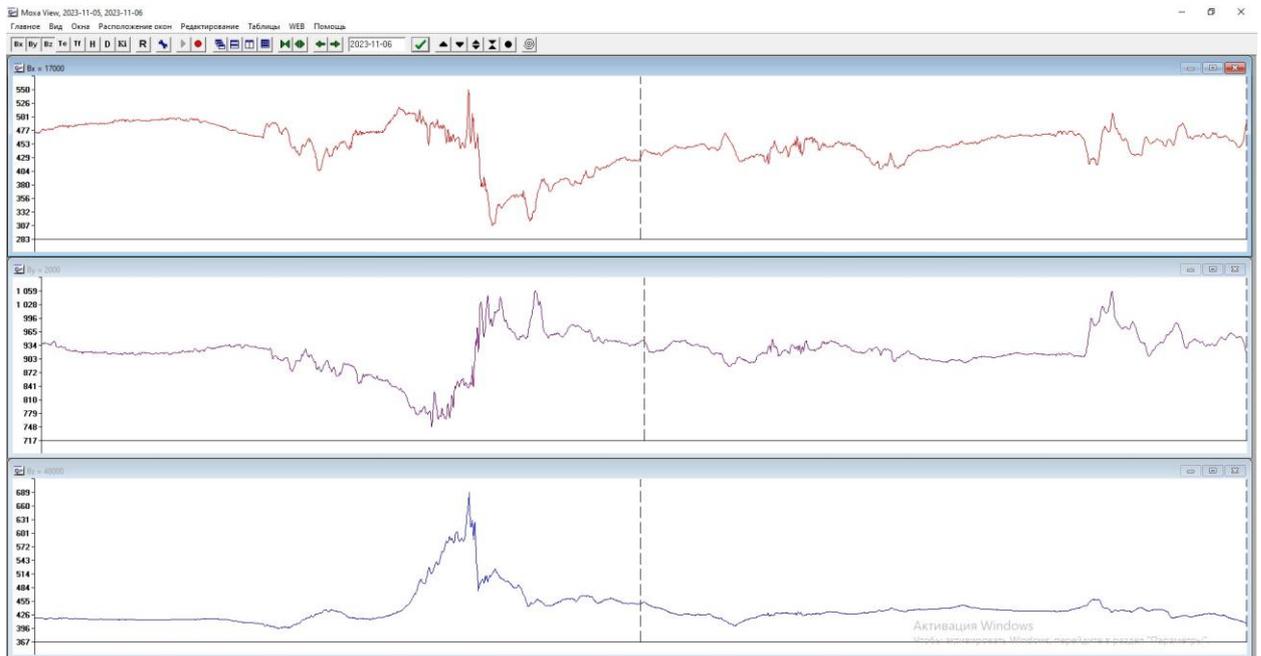


Рисунок 9.9 – Запись очень большой магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» с 5 по 6 ноября 2023 г.

Максимальное количество магнитных бурь (7) произошло в ноябре, а наименьшее (1) – в январе (рисунок 9.10). В 2023 г. произошло на 11 магнитных бурь меньше, чем в 2022 г. (61), и больше (в 1,805) среднего многолетнего значения (27,70) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

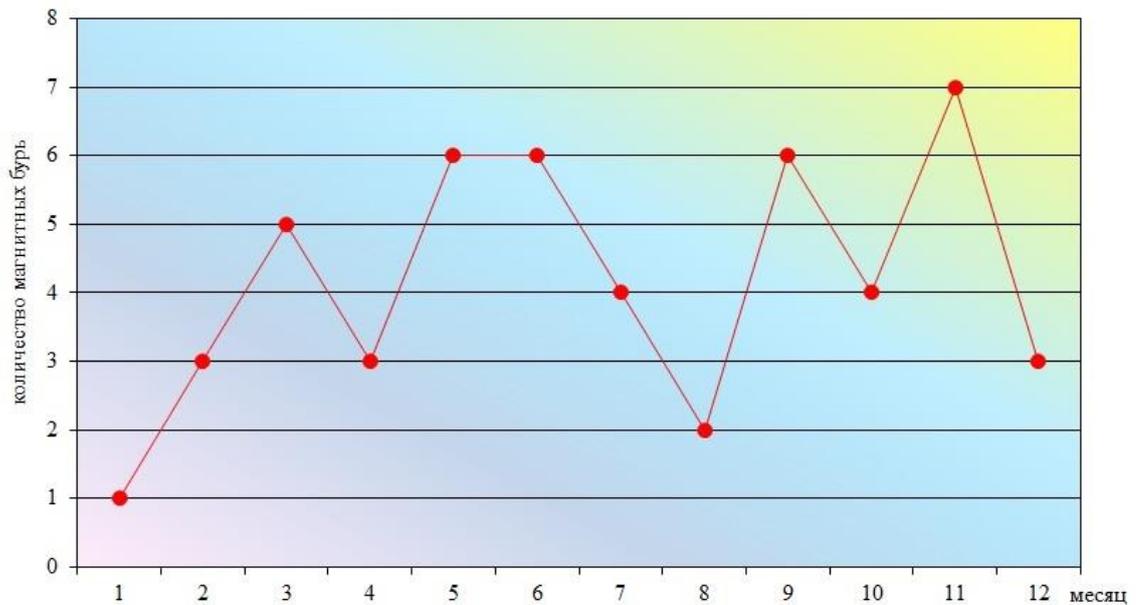


Рисунок 9.10 – График изменения числа магнитных бурь в 2023 г.

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. В 2023 г. намечилось небольшое снижение значений, которое остается достаточно большим и свидетельствует об активных возмущениях магнитного поля Земли, которые связаны с очередным периодом солнечной активности.

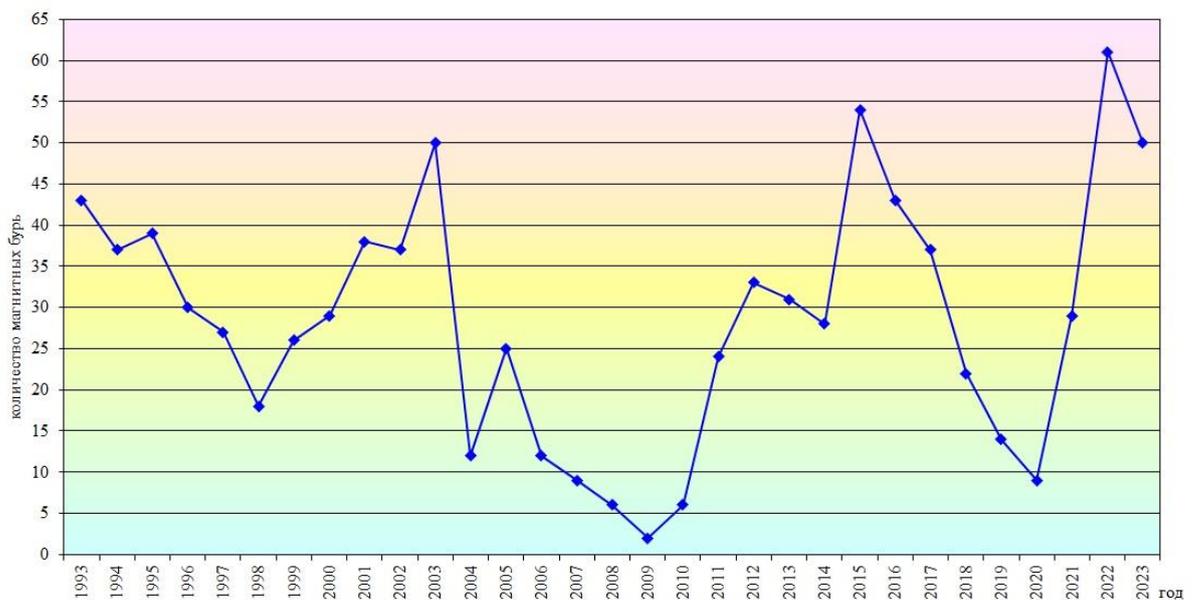


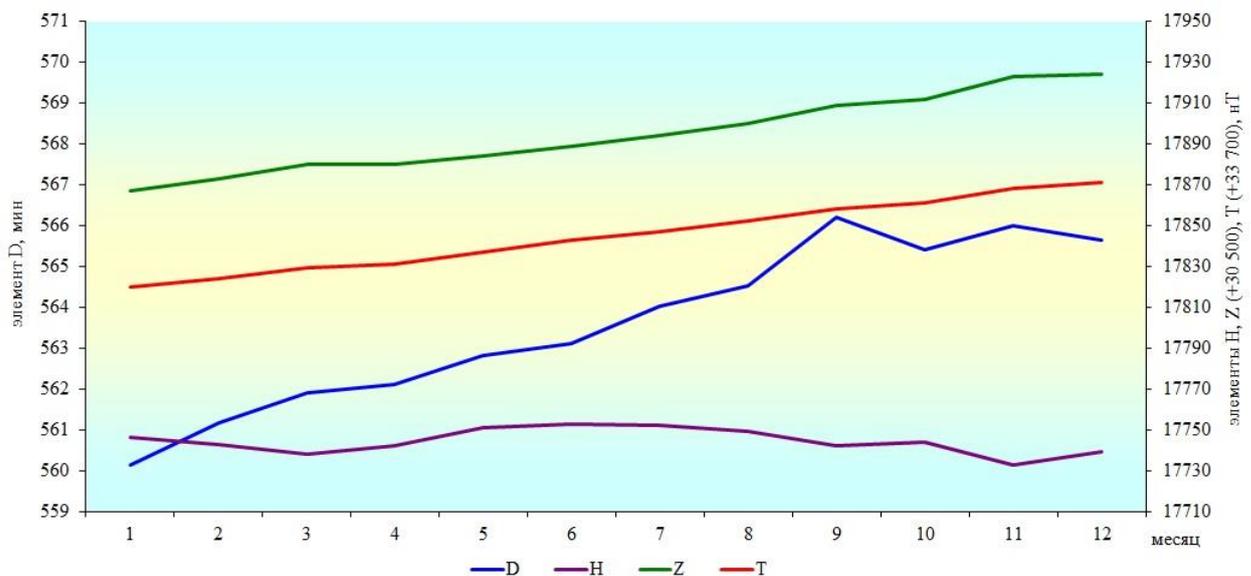
Рисунок 9.11 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993 – 2023 гг.

Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2023 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 апреле (рисунок 9.12). Максимальное значение (566,20 нТл) элемента D отмечено в сентябре, а минимальное – в январе (560,13 нТл). Среднегодовое значение (563,588 нТл) элемента D больше (на 117,972 нТл) среднего многолетнего значения (445,616 нТл) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

Распределение значений элемента H (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило неравномерно (рисунок 9.12). Снижение отмечено в феврале-марте, июле-сентябре, ноябре, а рост значений наблюдался в апреле-июне, октябре и декабре. Максимальное значение (17753 нТл) зафиксировано в июне, а минимальное – в ноябре (17733 нТл). Среднегодовое значение (17744,333 нТл) элемента H меньше (на 35,448 нТл) среднего многолетнего значения (17779,781 нТл) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

На протяжении всего года отмечался рост значений элемента Z (вертикальная составляющая магнитного поля) со стабилизацией значений в апреле (рисунок 9.12). Максимальное значение (48424 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (48367 нТл). Среднегодовое значение (48394,583 нТл) элемента Z больше (на 767,983 нТл) среднего многолетнего значения (47626,600 нТл) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

В течение года увеличивалось значение элемента T (полный вектор напряженности магнитного поля Земли) с небольшим замедлением роста в апреле (рисунок 9.12). Максимальное значение (51571 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (51520 нТл). Среднегодовое значение (51545,083 нТл) элемента T больше (на 707,816 нТл) среднего многолетнего значения (50837,267 нТл) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

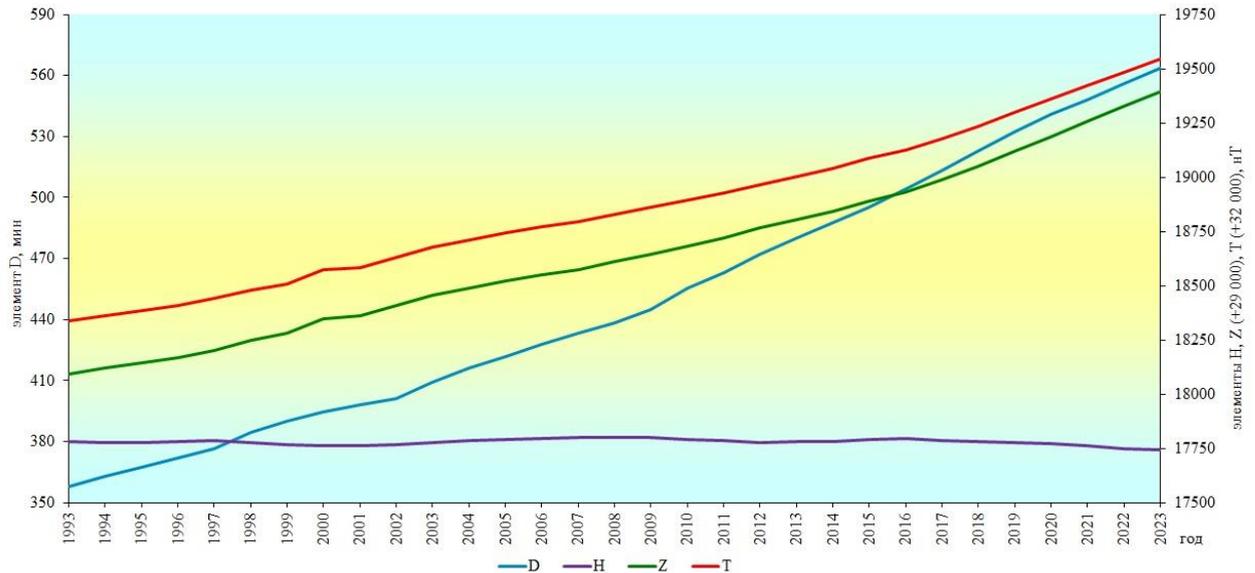


Условные обозначения: D – угловая составляющая магнитного поля, H – горизонтальная составляющая магнитного поля, Z – вертикальная составляющая магнитного поля, T – полный вектор напряженности магнитного поля Земли

Рисунок 9.12 – График изменения среднемесячных значений элементов D , H , Z , T в 2023 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 – 2023 гг. Вековой ход склонения D геомагнитного поля за период

наблюдений составил рост значений в среднем (6,632) в год. Вековой ход вертикальной составляющей Z составляет (41,954 нТл) в год, а полного вектора T геомагнитного поля (38,938 нТл) в год. Вековой ход горизонтальной составляющей H геомагнитного поля составляет в среднем (-1,151 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 – 2023 гг.

Международное сравнение

Глобальные сейсмологические наблюдения. В 2023 г. сетью сейсмических станций Республики Беларусь зарегистрировано и обработано 3463 землетрясения в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 164 землетрясения с магнитудой $M \geq 6,0$, в том числе 14 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 6 февраля (01^h17^m) в Турции, после основного землетрясения на протяжении нескольких месяцев наблюдалась серия афтершоков. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2023 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 ее часть приходится на Трансазиатский, Атлантический, Индийский сейсмические пояса и другие сейсмоактивные регионы Земли.

В 2023 г. наибольшее число землетрясений (412) зафиксировано в феврале, а наименьшее (225) в ноябре (рисунок 9.14). Количество произошедших землетрясений (3463) больше (на 200), чем в 2022 г. (3263), и больше (в 2,143) среднего многолетнего значения (1615,833) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

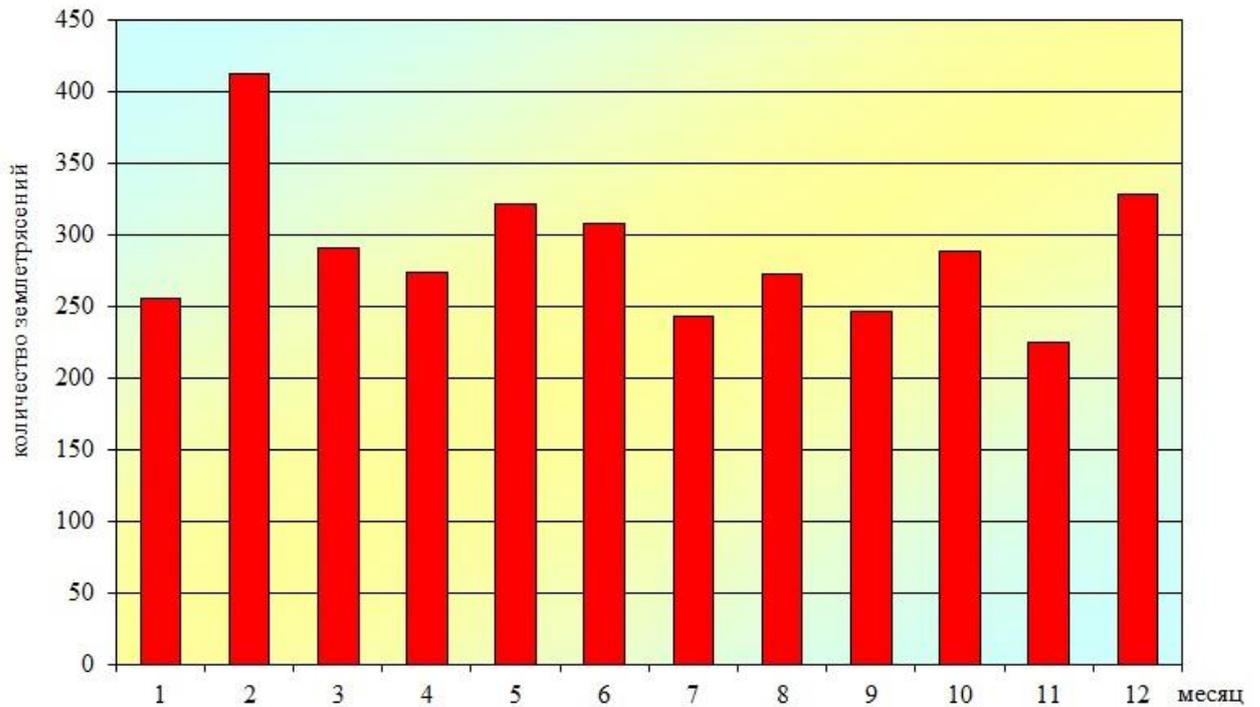


Рисунок 9.14 – График изменения количества землетрясений Земли в 2023 г.

На рисунке 9.15 представлен долговременный график количества землетрясений по годам за период с 1993 по 2023 гг. Наблюдаются 3 активных периода: в 1993 – 1996 гг. с максимумом землетрясений в 1995 г. (1450); в 2005 – 2011 гг. – 2005 г. (1674); в 2015 – 2023 гг. – 2023 г. (3463). Минимальное число землетрясений наблюдалось в 1998 г. (854), 2001 г. (886) и 2003 г. (895).

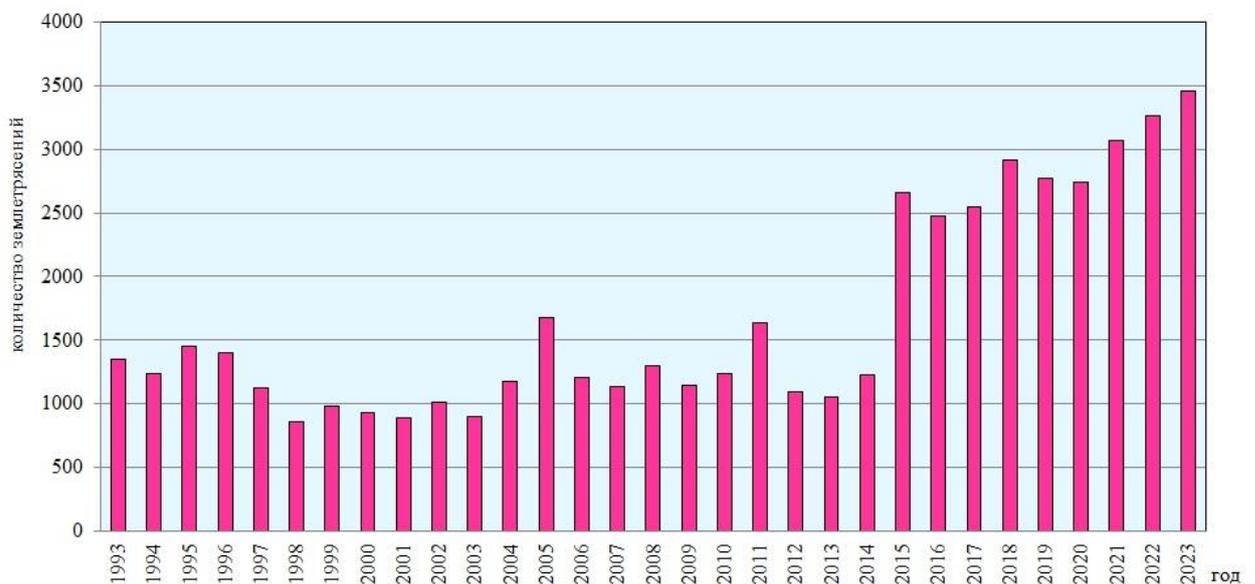


Рисунок 9.15 – График изменения во времени количества землетрясений Земли за 1993 – 2023 гг.

Региональные сейсмологические наблюдения. На территории Европы и смежных областях в 2023 г. зарегистрировано 1269 землетрясений с магнитудой $M \geq 3,0$, из них 97 событий с $M \geq 5,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $m_b=7,0$ и с магнитудой по поверхностной волне $M_s=7,8$ произошло 6 февраля (01^h17^m) в Турции. 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 (199) произошло в феврале, а наименьшее (65) в ноябре (рисунок 9.16). В 2023 г. отмечено (на 394) землетрясения больше, чем в 2022 г. (875) и больше (в 2,056) среднего многолетнего значения (617,167) за 30 лет (1993 – 2022 гг.).

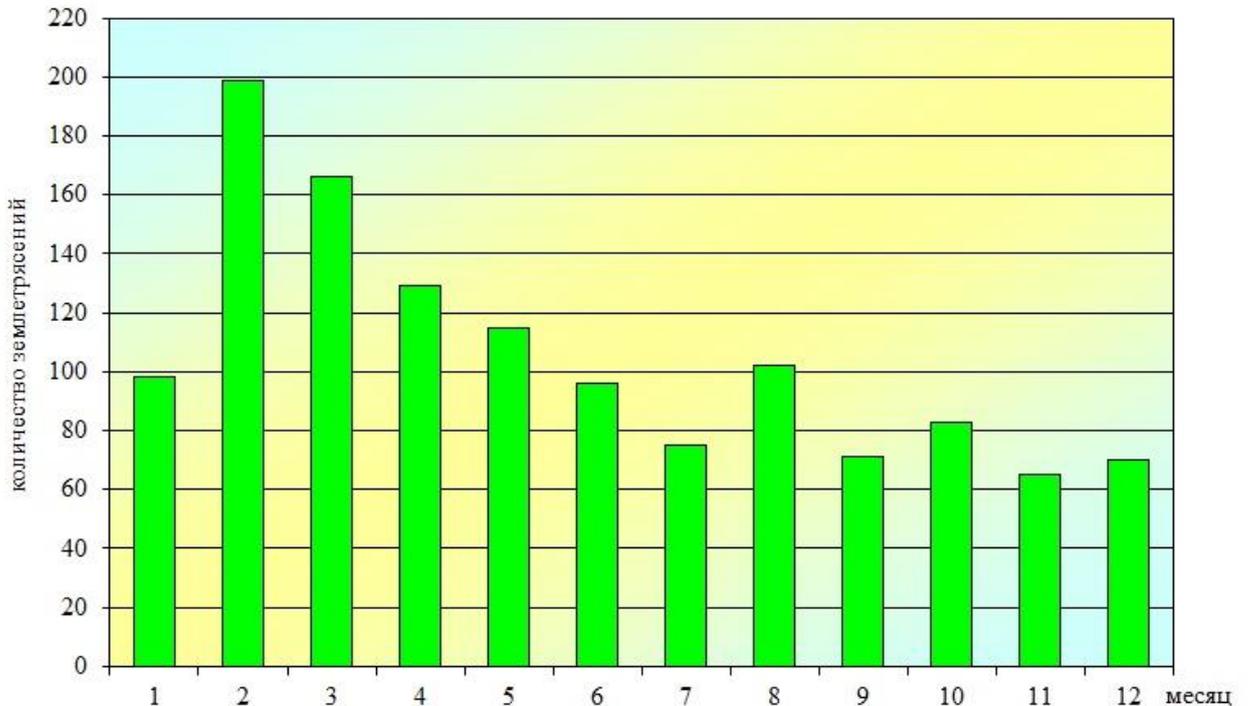


Рисунок 9.16 – График изменения количества землетрясений Европы и смежных областей в 2023 г.

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 – 2023 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., затем в 2013 – 2014 гг. произошло снижение 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. произошло снижение активности. В 2023 г. произошел резкий рост числа событий, связанный с афтершоковой активностью.

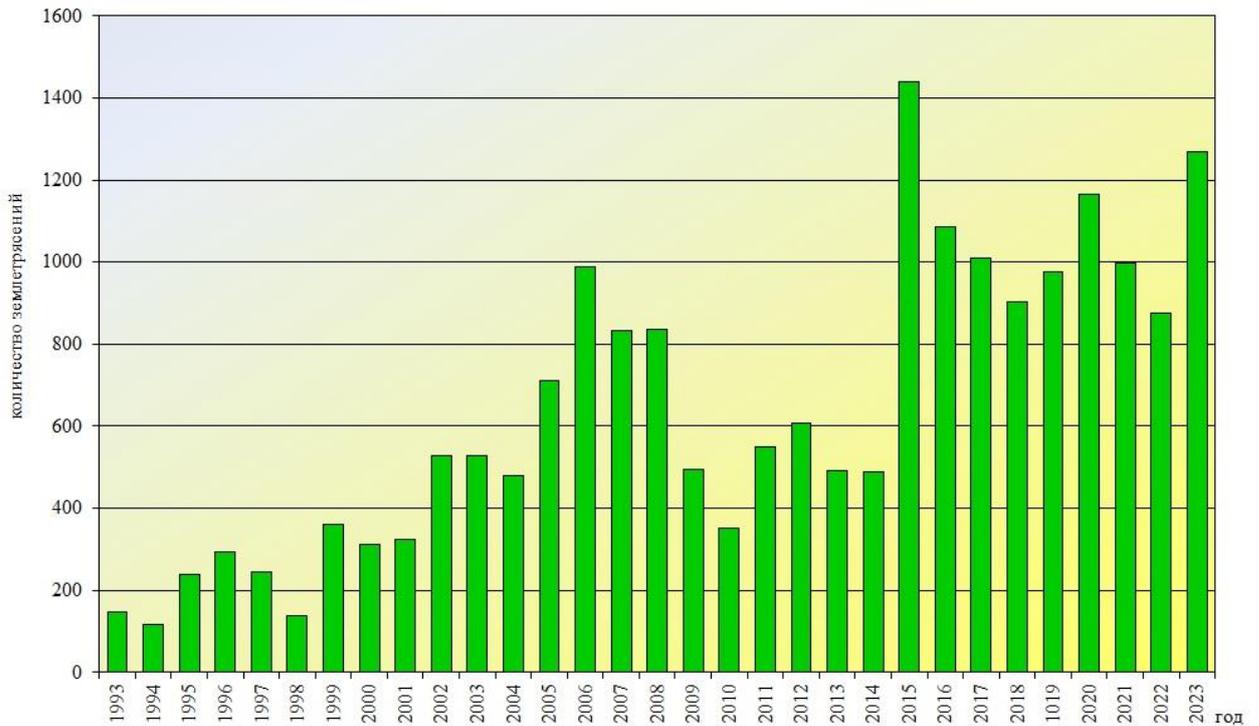


Рисунок 9.17 – График изменения во времени количества землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой $M \geq 3,0$ за 1993 – 2023 гг.

Комплексный анализ параметров сейсмичности. На основе анализа и обобщения данных сейсмологического мониторинга территории Земли, Европы и Республики Беларусь выполнен комплексный анализ параметров сейсмичности за период 1993 – 2023 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 Республике Беларусь 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 2023 г. наблюдался рост числа зафиксированных землетрясений на территории Земли, Европы и Республики Беларусь, как по отношению к 2022 г., так и к средним долговременным значениям.

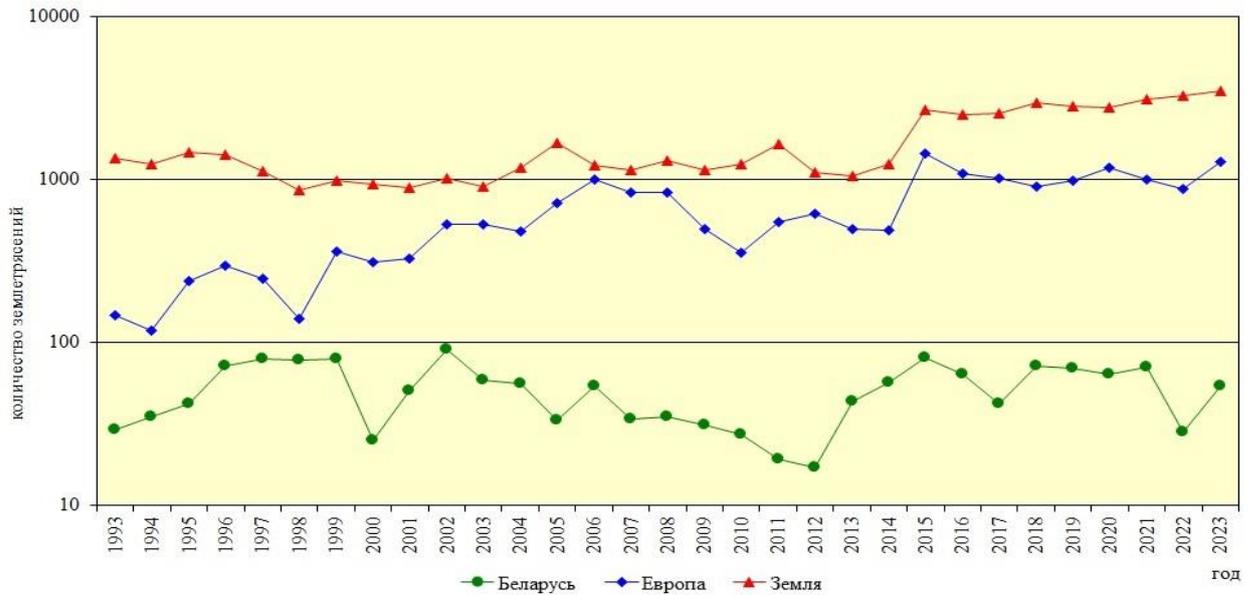


Рисунок 9.18 – График временного хода числа землетрясений на территории Земли, Европы и Республики Беларусь за период 1993 – 2023 гг.

Прогноз

Территория Республики Беларусь 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 Республики Беларусь 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.