

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 [45, 46].

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.

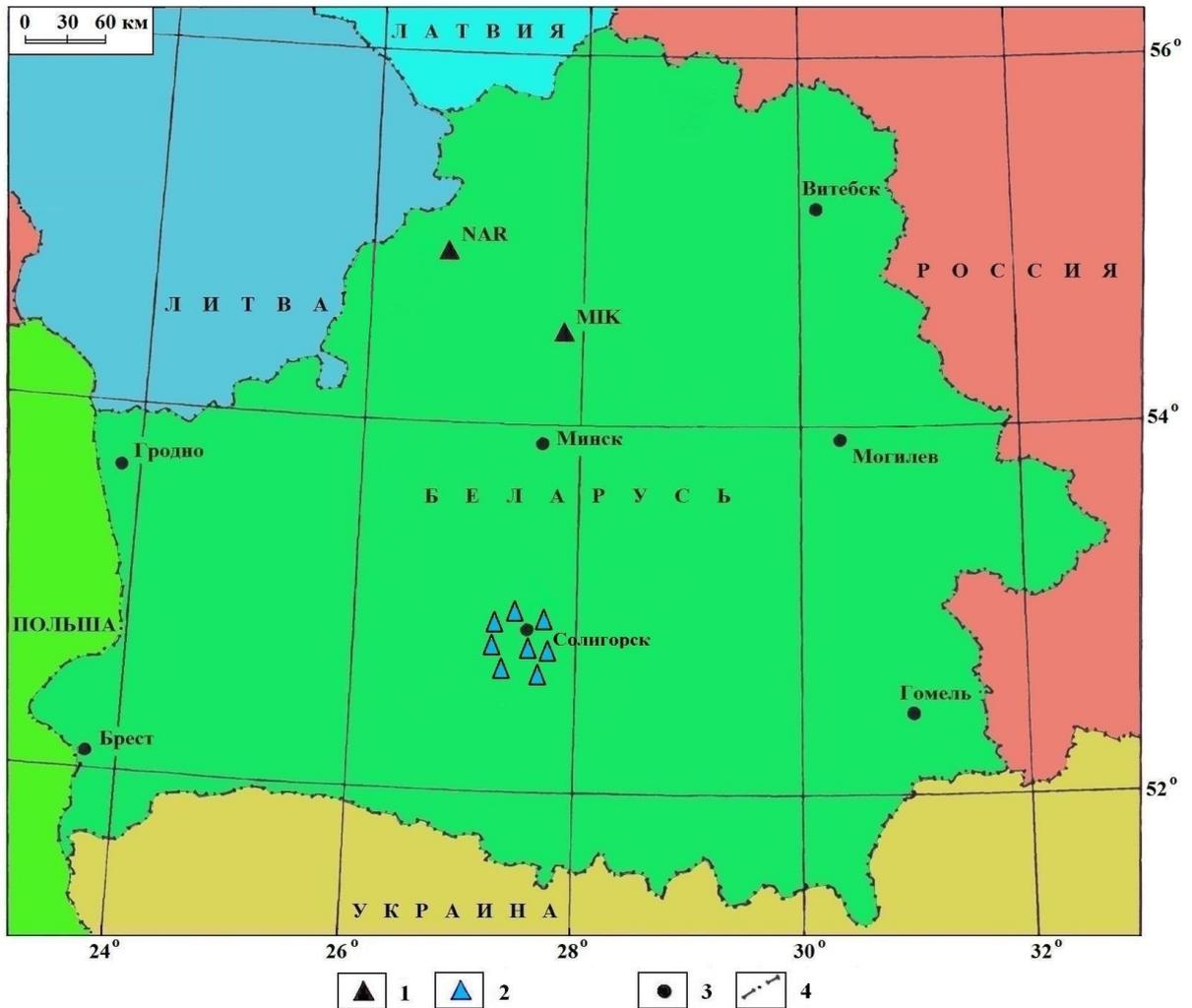
Сеть геофизического мониторинга Беларуси структурно состоит из трех уровней: глобальный, региональный и локальный. Глобальный и региональные уровни мониторинга обеспечивают геофизические обсерватории «Плещеницы» и «Нарочь»; региональный и локальный – сети сейсмических станций в Солигорском и Островецком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

В 2024 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 локальной сети сейсмических станций в Солигорском районе (восемь сейсмических станций: «Волоты», «Тесово», «Устронь», «Чижовка», «Копачевичи», «Раёвка», «Махновичи», «Листопадовичи») (рисунок 9.1).

Основная идея и выводы

Количество зарегистрированных землетрясений в 2024 г. на глобальном уровне составляет 5491 событие, на региональном – 648 и локальном – 62 землетрясения. Анализ сейсмичности показал, что, в целом, уровень сейсмической активности в 2024 г. повысился по отношению к 2023 г. и остается повышенным по отношению к средним многолетним значениям на глобальном, региональном и локальном уровнях.

В 2024 г. геомагнитной обсерваторией зафиксировано 48 магнитных бурь, среднегодовое значение суммарных K -индексов составляет 18,719. Определены среднегодовые значения векового хода элементов D (569,47), H (17743), Z (48452), T (51598) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли в 2024 году был на уровне 2023 года и оставался возмущенным.



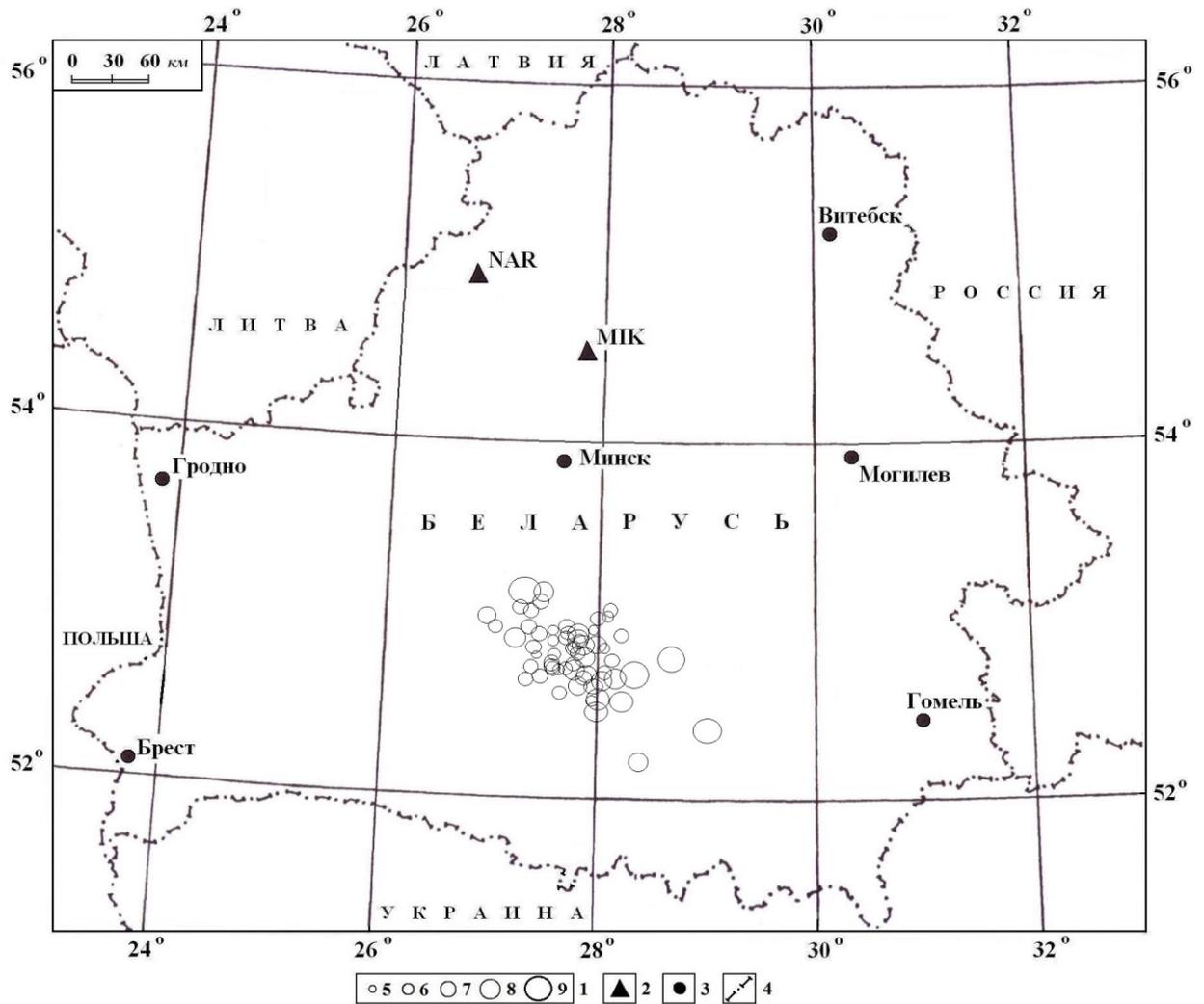
Условные обозначения: 1 – пункты наблюдений: геофизические обсерватории «Плещицы» – МİK и «Нарочь» – NAR; 2 – Солигорская локальная сейсмическая сеть; 3 – город; 4 – государственная граница

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 2024 г. зарегистрировано 62 землетрясения энергетического диапазона $K=5,4-9,1$ или в единицах локальной магнитуды $M=0,8-2,9$ (таблица 1). Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с $M=2,9$ ($K=9,1$) произошло 10 декабря в 00 ч. 21 м. (UTC), а наименьшее с $M=0,8$ ($K=5,4$) произошло 6 ноября в 20 ч. 58 м. (UTC). 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 Беларуси, 2024 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило не равномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ($1,8986 \cdot 10^9$ Дж) наблюдалось в декабре, а минимальное значение ($0,0096 \cdot 10^9$ Дж) отмечено в июне. Максимальное число произошедших сейсмических событий (8) зафиксировано в июле и декабре, а минимальное число событий (2) отмечено в июне.

В 2024 г. наблюдалось увеличение (на $0,4913 \cdot 10^9$ Дж) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии ($\Sigma E = 4,5450 \cdot 10^9$ Дж) по сравнению с 2023 г. ($\Sigma E = 4,0537 \cdot 10^9$ Дж), и увеличение (в 2,5408) по сравнению со средним многолетним значением ($\Sigma E = 1,7888 \cdot 10^9$ Дж) за 31 год (1993–2023). Количество произошедших сейсмических событий (62) больше (на 8), чем 2023 г. (54), и больше (в 1,215) среднего многолетнего значения ($N_{\Sigma} = 51,033$) за 31 год.

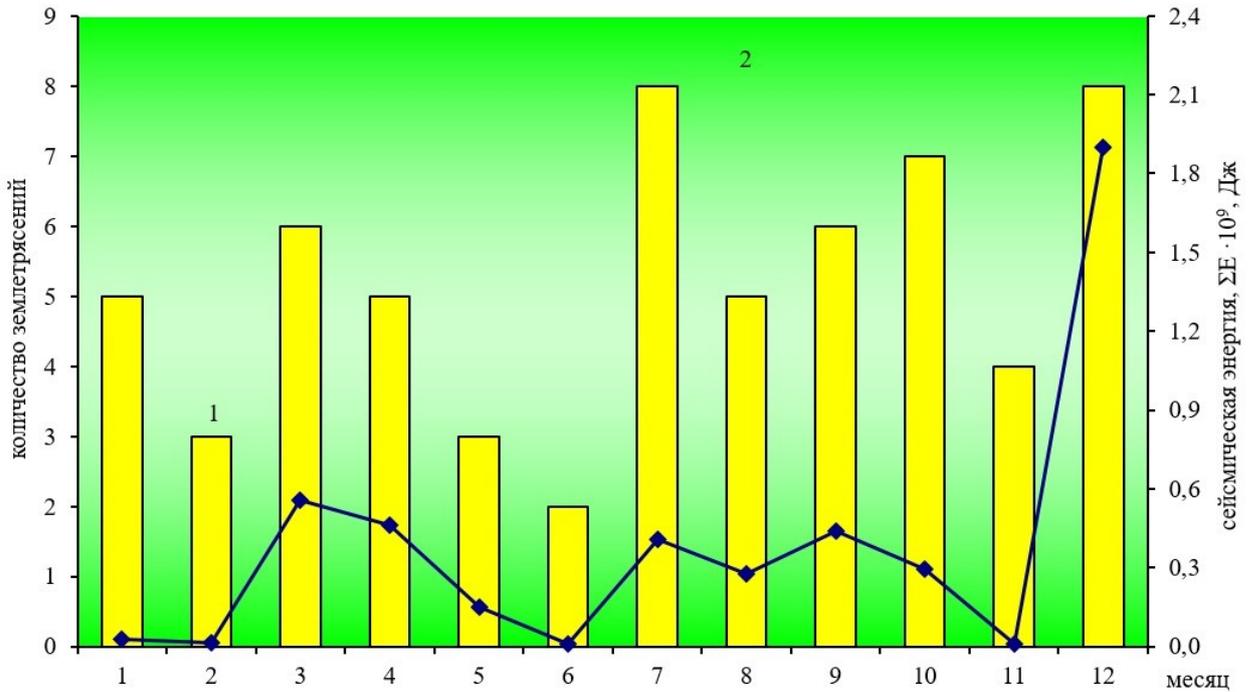


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2024 г.

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 (рисунок 9.4). Максимальные числа произошедших сейсмических событий отмечены в 1997–1999, 2002 и 2015 гг. Уровень сейсмической активности в 2024 г. ($N = 62$) повысился по отношению к 2023 г. ($N = 54$), и остается повышенным в (1,215) к средним многолетним значениям ($N_{ср.} = 51,033$) за 31 год (1993 – 2024 гг.).

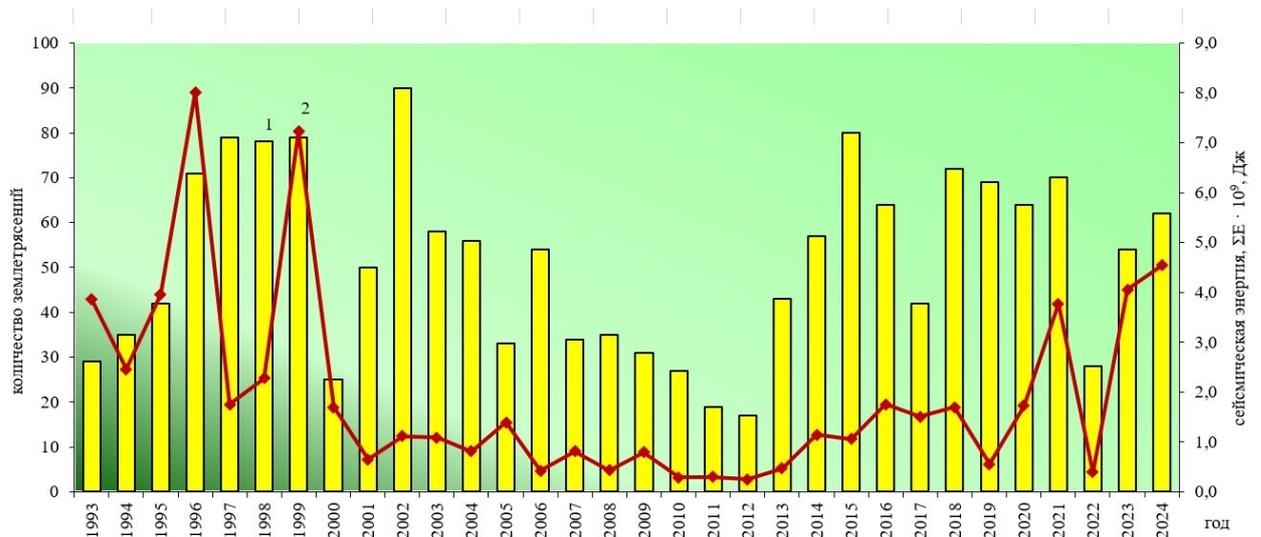


Рисунок 9.4 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993 – 2024 г.

Анализ частоты реализации сейсмических событий в разные годы, не выявил четкого проявления максимумов числа событий в определенное время суток (рисунок 9.5).

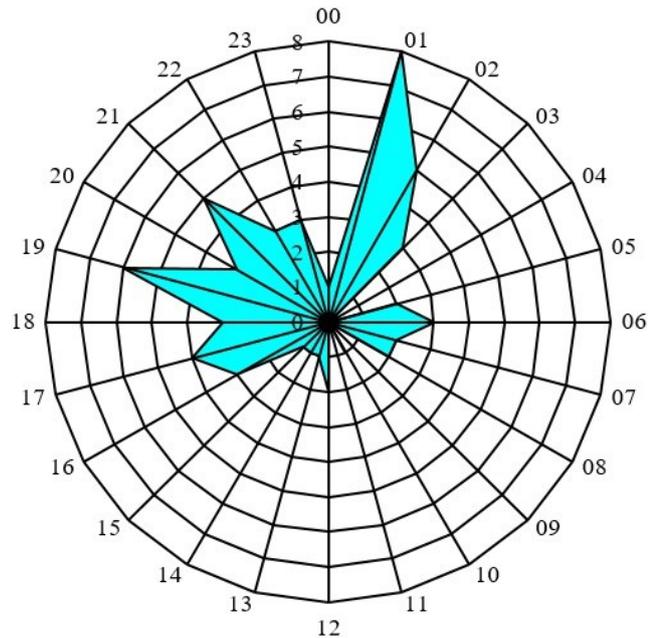


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2024 г. по часам суток

Далее представлено распределение всех землетрясений за 2024 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в понедельник (19,4 %), а минимум в четверг (9,7 %). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявление максимума в определенный день (рисунок 9.6).

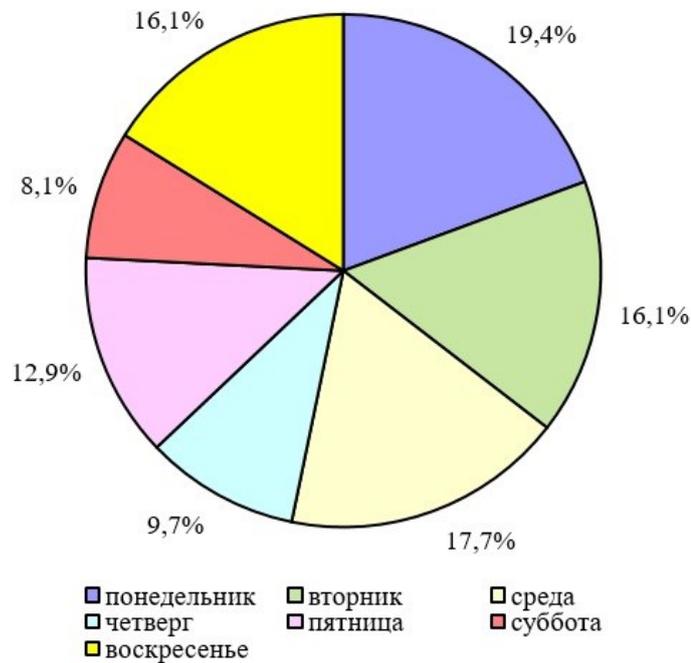


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2024 г.

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 2024 г. выполнено 285 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 2024 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 марте, мае, сентябре и августе, снижение происходило в январе-феврале, апреле, июле, сентябре-декабре. Максимальное среднемесячное суммарное значение K -индексов отмечено в мае (24,3), а минимальное – в феврале (12,6). Среднегодовое значение (18,719) суммарных K -индексов в 2024 г. меньше (на 0,256), чем в 2023 г. (18,975) и больше (в 1,063) среднего многолетнего значения (17,613) за 31 год (1993 – 2023 гг.).

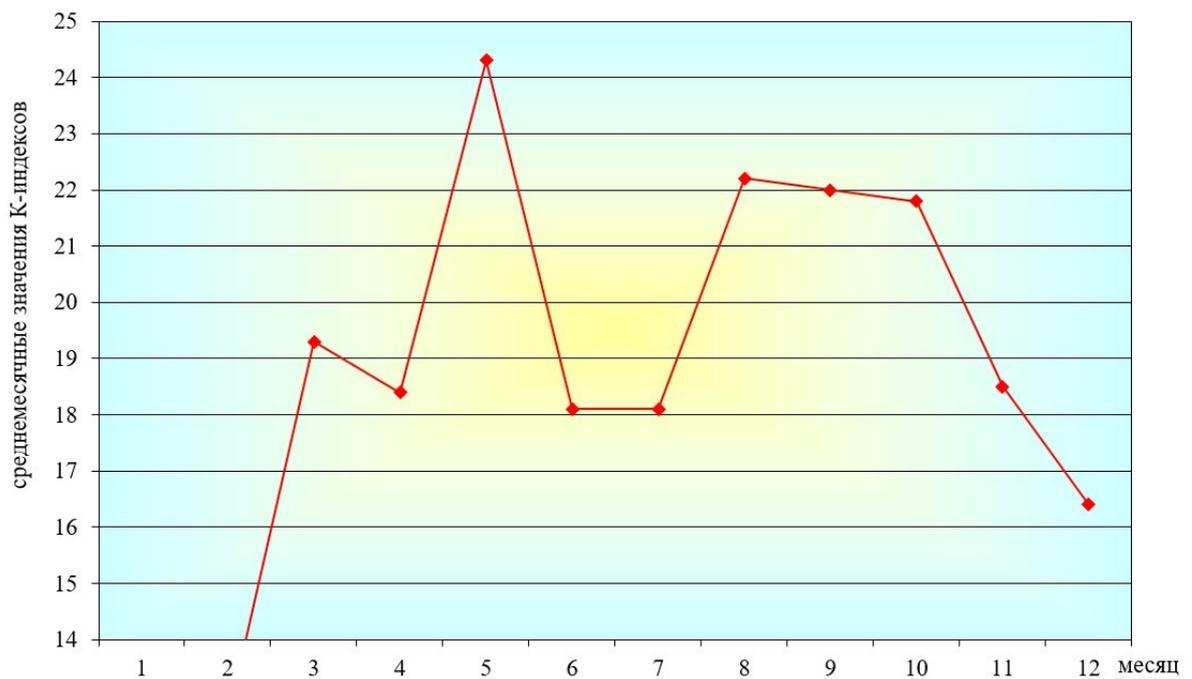


Рисунок 9.7 – График изменения среднемесячных значений суммарных K -индексов в 2024 г.

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 произошёл в 2021 – 2023 гг. В 2024 г. зарегистрировано небольшое снижение значений. Максимальные значения среднегодовых значений суммарных K -индексов (24) наблюдались в 2000, 2004, 2005 гг., минимальные значения (13) отмечено в 2009 и 2020 гг.

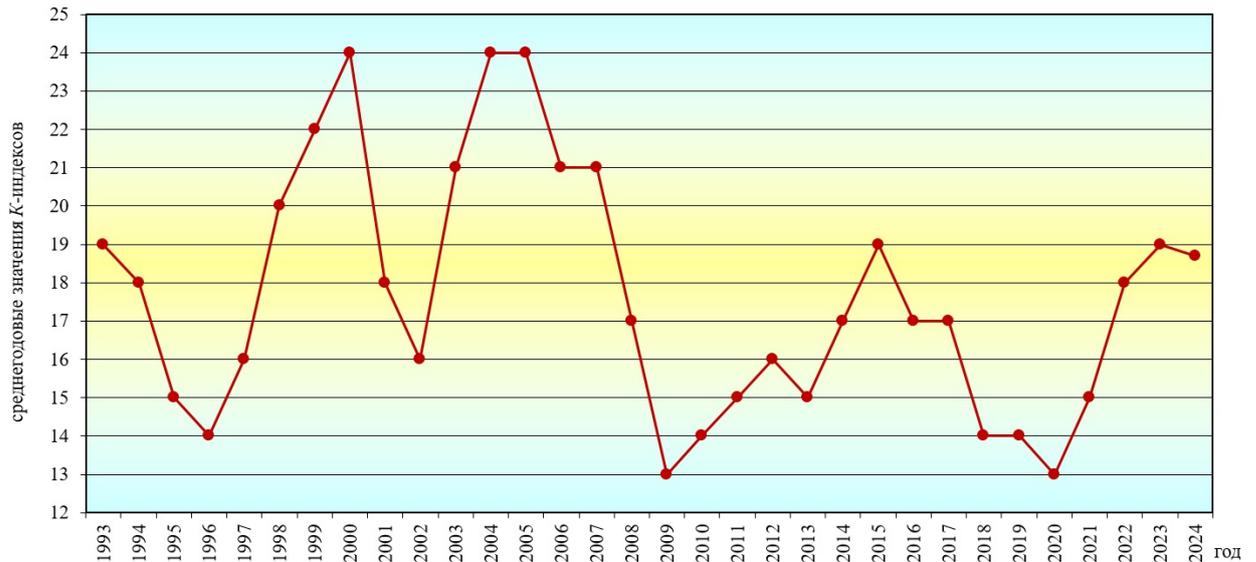


Рисунок 9.8 – График долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K -индексов за 1993–2024 гг.

В 2024 г. зафиксировано и обработано 48 магнитных бурь, из них 29 малых бурь (М), 10 умеренных бурь (У), 5 больших бури (Б) и 4 очень больших бури (ОБ).

Далее представлена основная панель управления прибора LEMI-022 с записью очень большой магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 10 – 12 мая 2024 г, продолжительность бури более 30 часов. Во время этой бури на территории Беларуси наблюдалось северное сияние (рисунок 9.9).

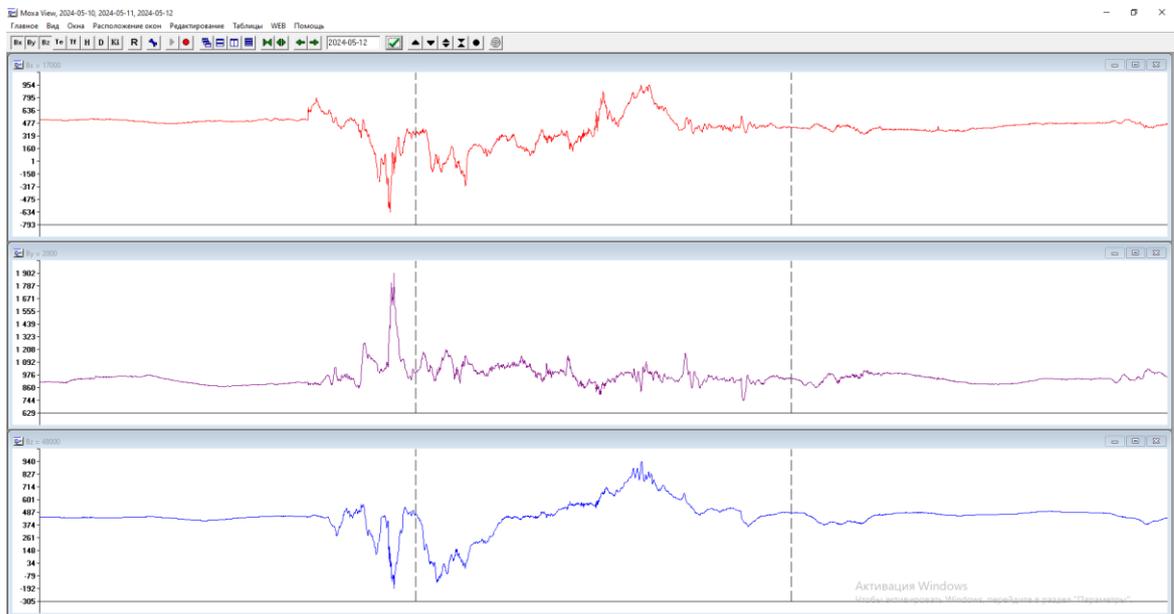


Рисунок 9.9 – Запись очень большой магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 10 – 12 мая 2024 г.

Максимальное количество магнитных бурь (7) произошло в мае, августе и сентябре, а наименьшее (0) в январе и феврале (рисунок 9.10). В 2024 г. (48) геомагнитных бурь наблюдалось на 2 меньше, чем в 2023 г. (50), и больше (в 1,689) среднего многолетнего значения (28,419) за 31 год (1993 – 2023 гг.).

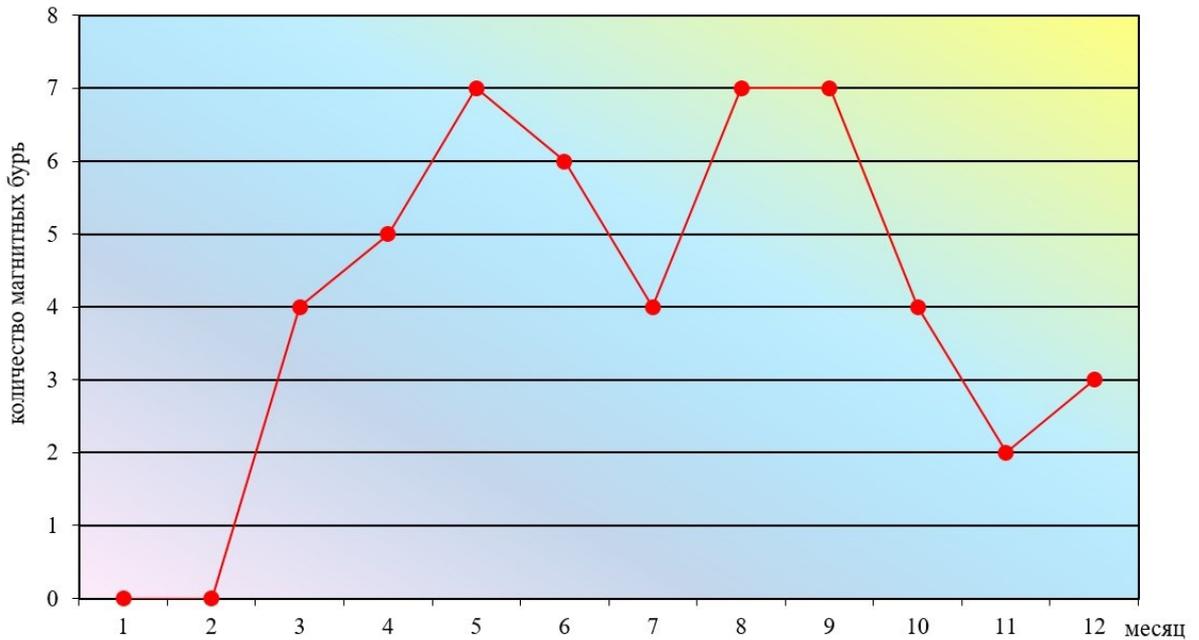


Рисунок 9.10 – График изменения числа магнитных бурь в 2024 г.

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. наметилось небольшое снижение значений, которое продолжилось в 2024 г. При этом, общий уровень значений остается достаточно большим, что свидетельствует об активных возмущениях магнитного поля Земли, которые связаны с очередным периодом солнечной активности.

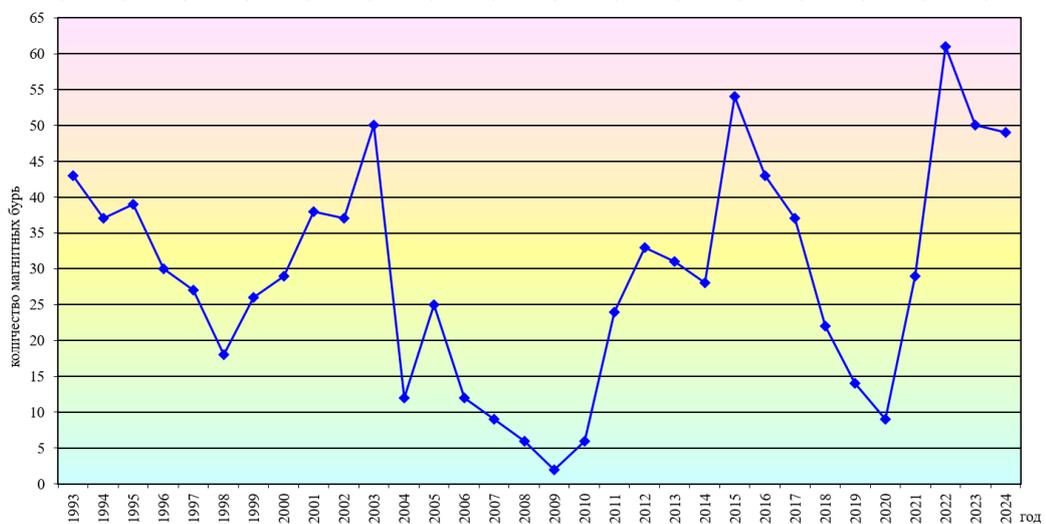


Рисунок 9.11 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993 – 2024 гг.

Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2024 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 (572,33 нТл) элемента D отмечено в октябре, а минимальное – в январе (566,15 нТл). Среднегодовое значение (569,47 нТл) элемента D больше (на 120,05 нТл) среднего многолетнего значения (449,42 нТл) за 32 года (1993 – 2024 гг.).

Распределение значений элемента H (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило не равномерно (рисунок 9.12). Снижение отмечено в феврале–мае, августе–октябре, а рост значений наблюдался в июне–июле и ноябре–декабре. Максимальное значение (17757 нТл) зафиксировано в июле, а минимальное – в октябре (17728 нТл). Среднегодовое значение (17743 нТл) элемента H меньше (на 36 нТл) среднего многолетнего значения (17779 нТл).

На протяжении всего года отмечался рост значений элемента Z (вертикальная составляющая магнитного поля) (рисунок 9.12). Максимальное значение (48480 нТл) отмечено в ноябре–декабре, а минимальное – в феврале (48419 нТл). Среднегодовое значение (48452 нТл) элемента Z больше (на 801 нТл) среднего многолетнего значения (47651 нТл).

В течение года увеличивалось значение элемента T (полный вектор напряженности магнитного поля Земли) с небольшим замедлением роста в январе–феврале и сентябре–октябре (рисунок 9.12). Максимальное значение (51625 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе–феврале (51571 нТл). Среднегодовое значение (51598 нТл) элемента T больше (на 738 нТл) среднего многолетнего значения (50860 нТл).

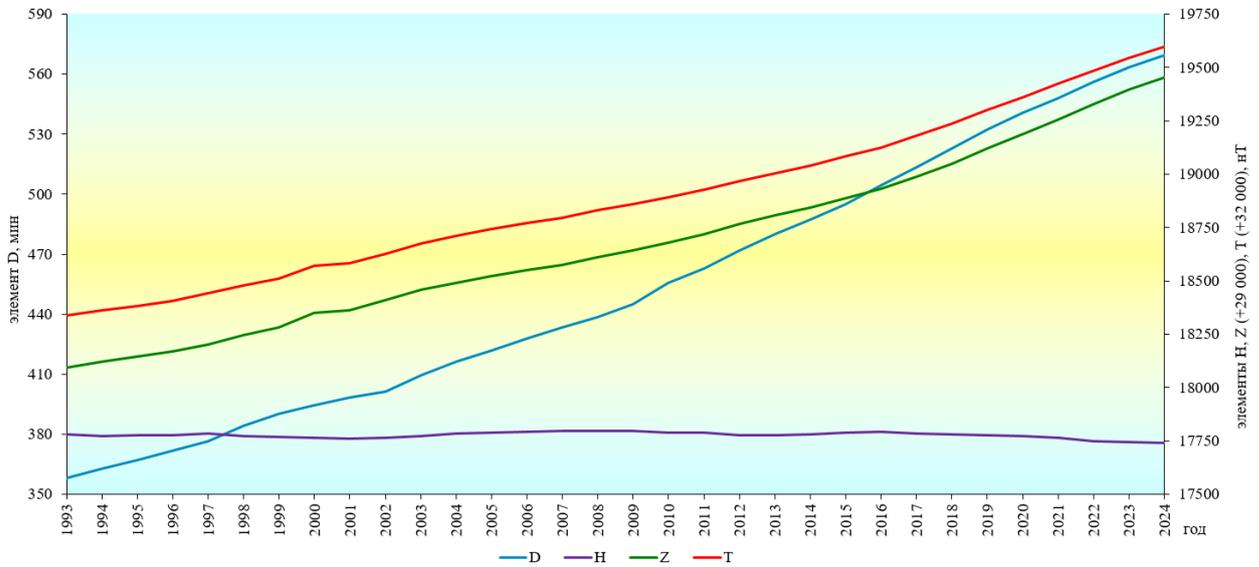


Условные обозначения: D – угловая составляющая магнитного поля, H – горизонтальная составляющая магнитного поля, Z – вертикальная составляющая магнитного поля, T – полный вектор напряженности магнитного поля Земли

Рисунок 9.12 – График изменения среднемесячных значений элементов D , H , Z , T в 2024 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 показан годовой ход элементов D , H , Z , T геомагнитного

поля Земли на геомагнитной обсерватории «Минск» (Плещеницы) за период 1993 – 2024 гг. (рисунок 9.13). 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 – 2024 гг.

Международное сравнение

Глобальный сейсмологический мониторинг. В 2024 г. сетью сейсмических станций Беларуси зарегистрировано и обработано 5491 землетрясение в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 115 землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, в том числе 9 событий с $M \geq 7,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $mb=6,9$ и по поверхностной волне $M_s=7,7$ произошло 4 апреля ($23^{\text{h}}58^{\text{m}}$) на Тайване. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2024 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 Трансзиатский, Атлантический, Индийский сейсмические пояса и другие сейсмоактивные регионы Земли.

В 2024 г. наибольшее число землетрясений (549) зафиксировано в апреле, а наименьшее (405) в июне (рисунок 9.14). Количество произошедших землетрясений

(5491) больше (на 2028), чем в 2023 г. (3463), и больше (в 3,060) среднего многолетнего значения (1794,656) за 31 год (1993 – 2024 гг.).

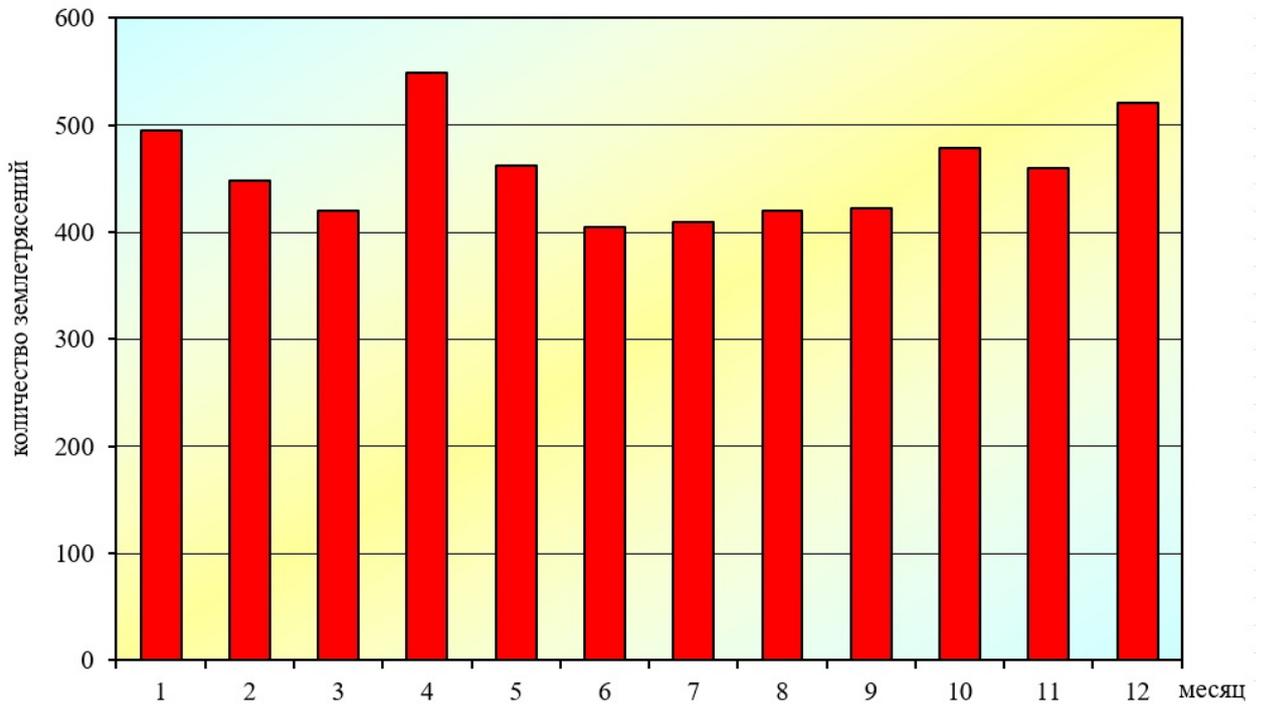


Рисунок 9.14 – График изменения количества землетрясений Земли в 2024 г.

На рисунке представлен долговременный график количества землетрясений по годам за период с 1993 по 2024 гг. (рисунок 9.15). Наблюдаются 3 активных периода: в 1993 – 1996 гг. с максимумом землетрясений в 1995 г. (1450); в 2005 – 2011 гг. – 2005 г. (1674); в 2015 – 2024 гг. – 2024 г. (5491). Минимальное число землетрясений наблюдалось в 1998 г. (854), 2001 г. (886) и 2003 г. (895).

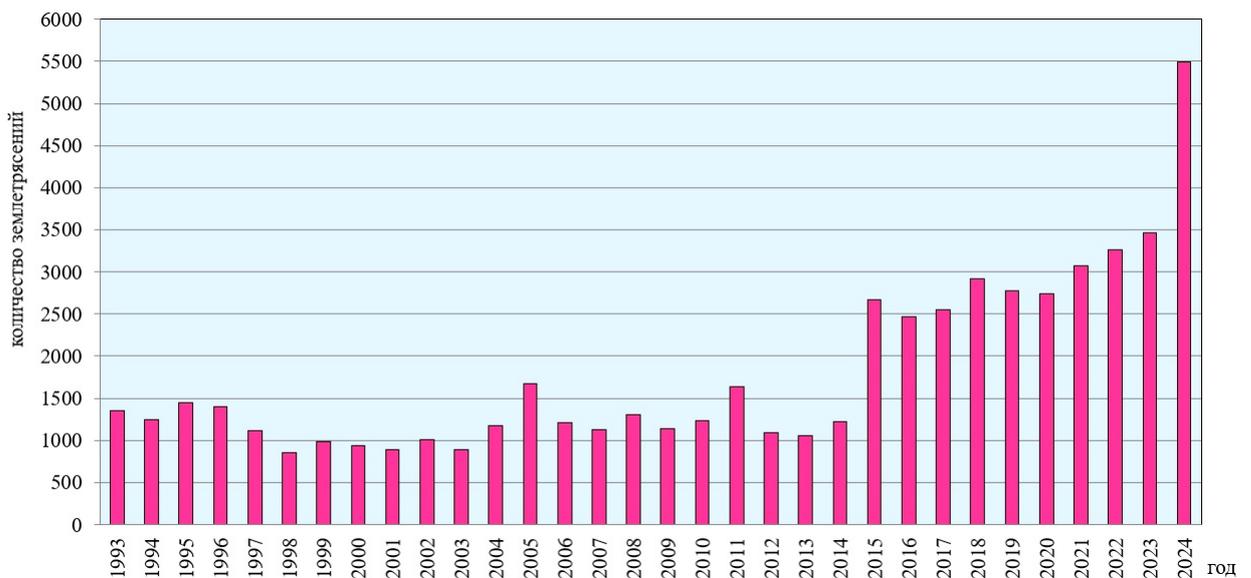


Рисунок 9.15 – График изменения во времени количества землетрясений Земли за 1993–2024 гг.

Региональный сейсмологический мониторинг. На территории Европы и смежных областях в 2024 г. зарегистрировано 648 землетрясений с магнитудой $M \geq 3,0$, из них

41 событий с $M \geq 5,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $mb=5,8$ произошло 28 августа ($16^h 29^m$) на о. Крит, Греция. 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 (8) произошло в октябре, а наименьшее (38) в феврале (рисунок 9.16). В 2024 г. произошло на 621 землетрясение меньше, чем в 2023 г. (1269) и больше (в 1,014) среднего многолетнего значения (638,500) за 31 год (1993 – 2023 гг.).

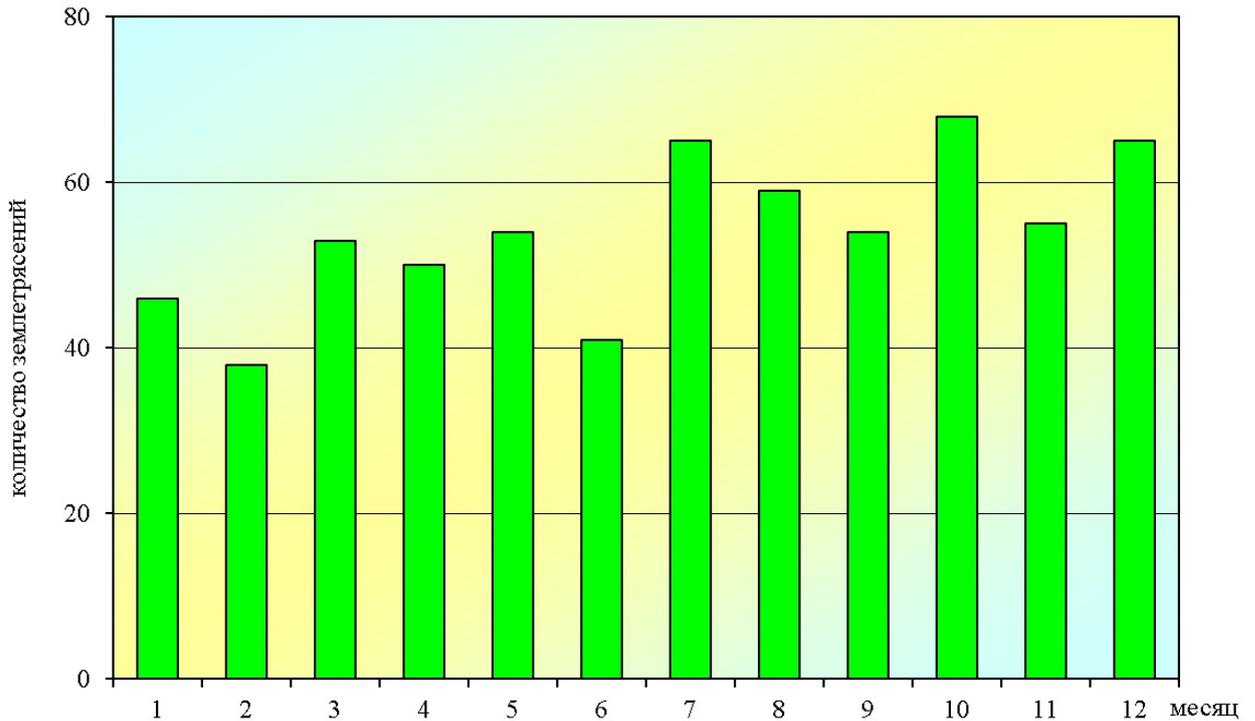


Рисунок 9.16 – График изменения количества землетрясений Европы и смежных областей в 2024 г.

На рисунке представлен долговременный график хода количества землетрясений на территории Европы и смежных областях с магнитудами $M \geq 3,0$ за период 1993 – 2024 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 (рисунок 9.17). 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. В 2024 г. активность сократилась почти в два раза.

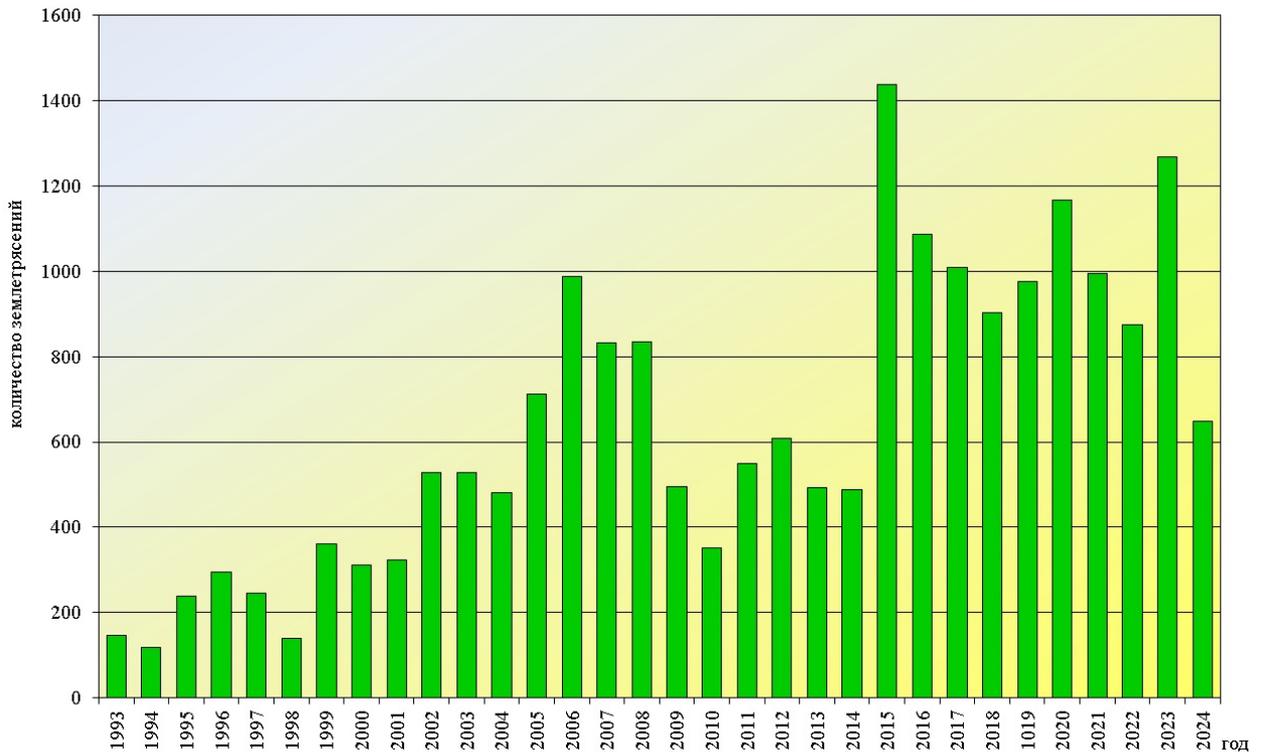


Рисунок 9.17 – График изменения во времени количества землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой $M \geq 3,0$ за 1993 – 2024 гг.

Комплексный анализ параметров сейсмичности. На основе анализа и обобщения данных сейсмологического мониторинга территории Земли, Европы и Беларуси выполнен комплексный анализ параметров сейсмичности за период 1993 – 2024 гг. (рисунок 9.18).

Анализ сейсмичности показал, что на территории Земли максимальное число землетрясений (5491) зафиксировано в 2024 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 2024 г. наблюдался значительный рост числа зафиксированных землетрясений на территории Земли, при этом на территории Европы количество землетрясений зарегистрировано почти в 2 раза меньше по отношению к 2023 году. В Беларуси в 2024 году сейсмичность незначительно увеличилась как по отношению к 2023 году, так и к средним долговременным значениям.

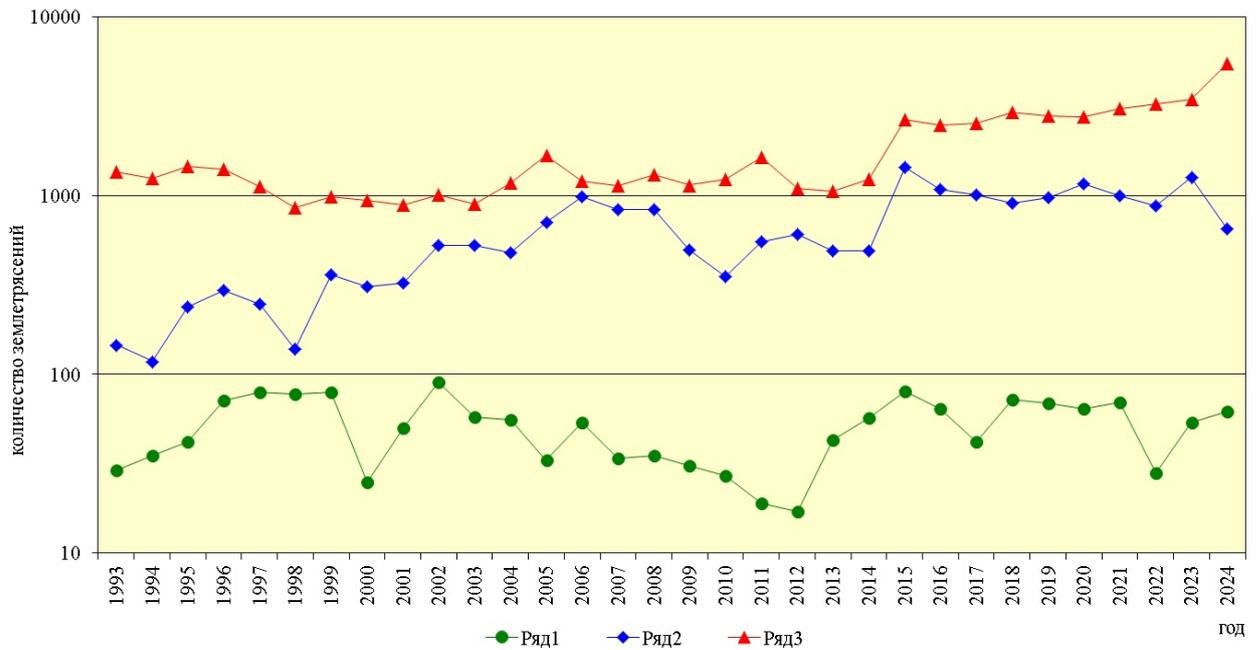


Рисунок 9.18 – График временного хода числа землетрясений на территории Земли, Европы и Беларуси за период 1993 – 2024 гг.

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.