

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 [56, 57].

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 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 2025 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», «Копацевичи», «Раёвка», «Махновичи», «Листопадовичи») (рисунок 9.1).

Основной посыл и выводы

Количество зарегистрированных землетрясений в 2025 г. на глобальном уровне составляет 7608 событий, на региональном – 1101 и локальном – 78 землетрясений. Анализ сейсмичности показал, что, в целом, уровень сейсмической активности в 2025 г. повысился по отношению к 2024 г. и остается повышенным по отношению к средним многолетним значениям на глобальном, региональном и локальном уровнях.

В 2025 г. геомагнитной обсерваторией зафиксировано 80 магнитных бурь, среднегодовое значение суммарных K -индексов составляет 21,792. Определены среднегодовые значения векового хода элементов D (575,16), H (17742), Z (48520), T (51662) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли в 2025 г. был выше уровня 2024 г. и оставался средне-возмущенным.

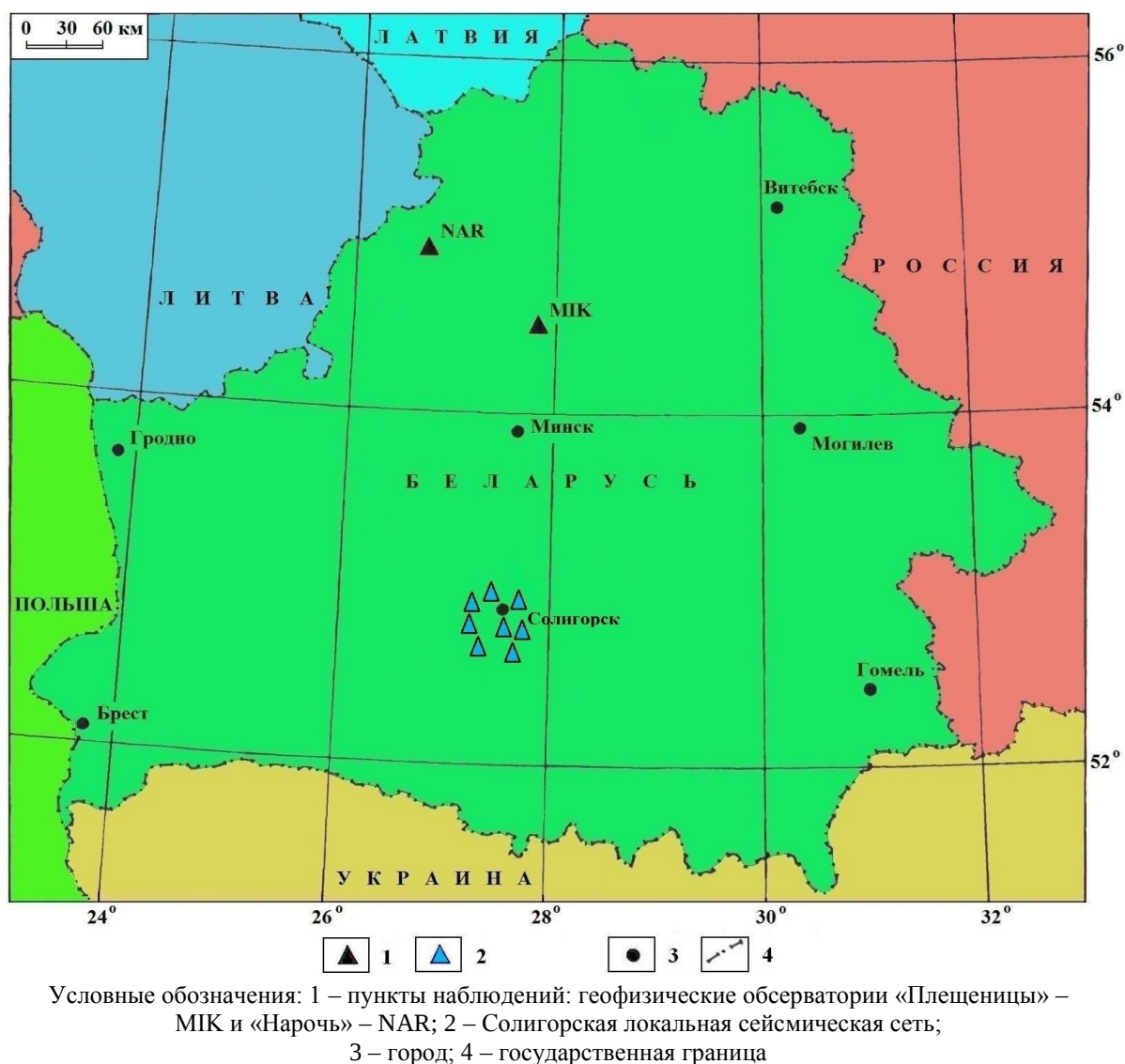


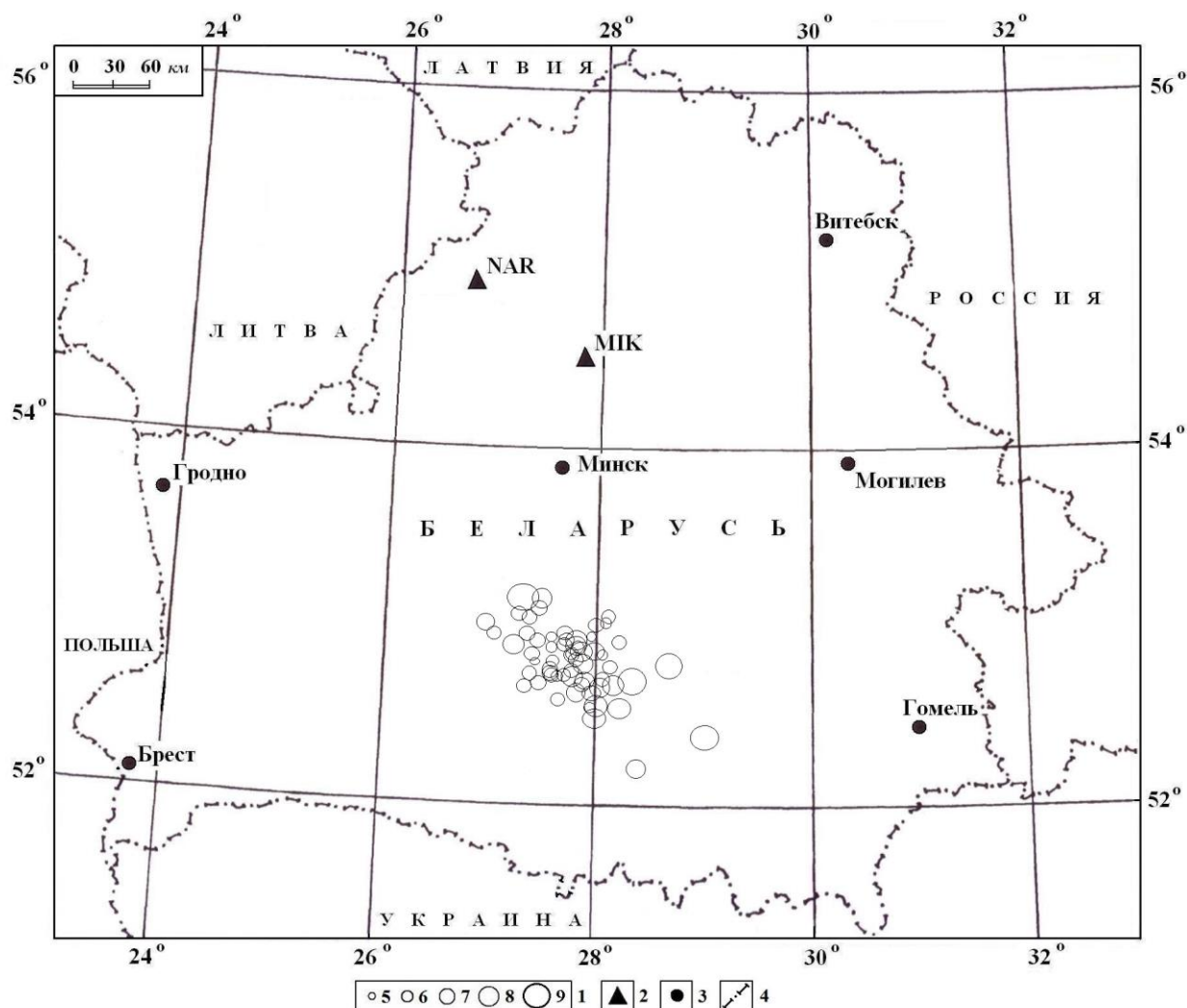
Рисунок 9.1 – Сеть пунктов наблюдений геофизического мониторинга

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 Республики Беларусь в 2025 г. зарегистрировано 78 землетрясений энергетического диапазона $K=5,0-8,8$ или в единицах локальной магнитуды $M=0,6-2,7$. Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с $M=2,7$ ($K=8,8$) произошло 19 января в 01 ч. 55 м. (UTC), а наименьшее с $M=0,6$ ($K=5,0$) произошло 22 января в 03 ч. 09 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 Республики Беларусь, 2025 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило неравномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ($1,5813 \cdot 10^9$ Дж) наблюдалось в феврале, а минимальное значение ($0,0013 \cdot 10^9$ Дж) отмечено в сентябре. Максимальное число произошедших сейсмических событий (11) зафиксировано в феврале, а минимальное число событий (1) отмечено в сентябре.

В 2025 г. наблюдалось снижение (на $0,1610 \cdot 10^9$ Дж) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии ($\Sigma E = 4,3840 \cdot 10^9$ Дж) по сравнению с 2024 г. ($\Sigma E = 4,5450 \cdot 10^9$ Дж), и увеличение (в 2,2532) по сравнению со средним многолетним значением ($\Sigma E = 1,9457 \cdot 10^9$ Дж) за 32 года (1993 – 2024). Количество произошедших сейсмических событий (78) больше (на 16), чем в 2024 г. (62), и больше (в 1,515) среднего многолетнего значения ($N_{\Sigma} = 51,469$) за 32 года.

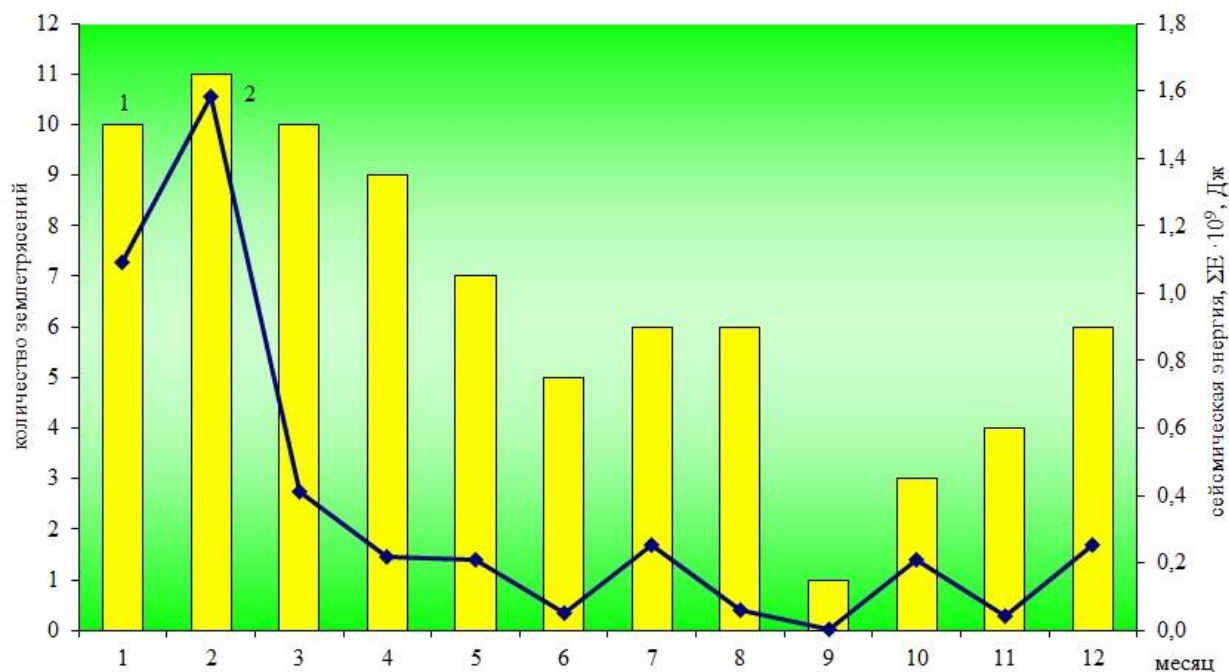


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2025 г.

Анализ долговременного проявления сейсмического процесса на территории Республики Беларусь показал, что максимальные значения суммарной выделившейся сейсмической энергии наблюдались в 1996 (8,0120) и 1999 (7,2272) гг., минимальные отмечены в 2010 (0,2867) и 2012 (0,2489) гг. (рисунок 9.4). Максимальные числа произошедших сейсмических событий отмечены в 2002 (90) и 2015 (80) гг., минимальные отмечены в 2011 (19) и 2012 (17) гг.

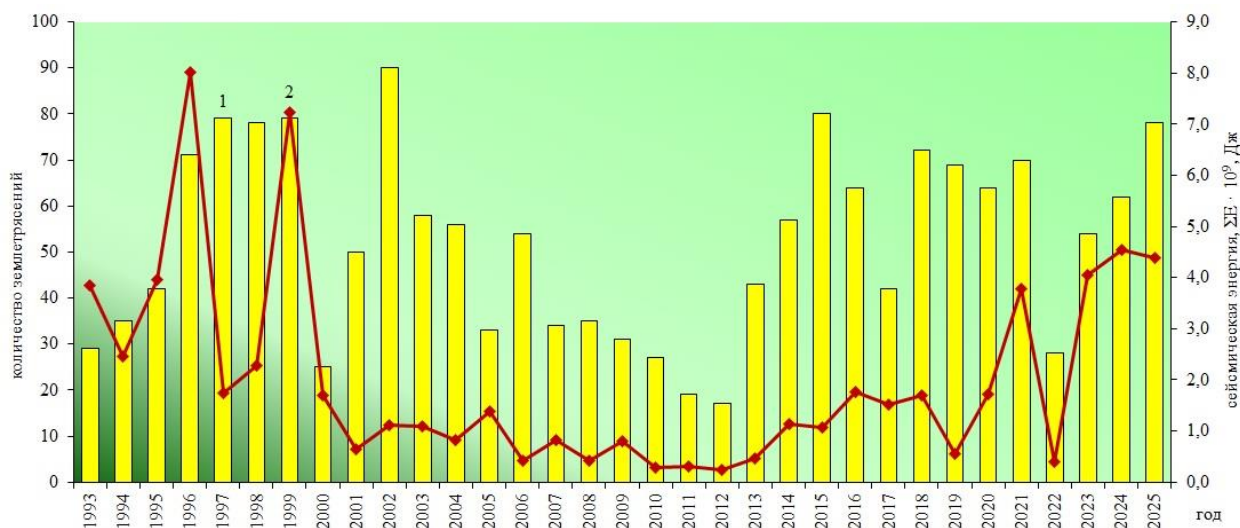


Рисунок 9.4 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993 – 2025 гг.

Анализ частоты реализации сейсмических событий в разные годы не выявил четкого проявления максимумов числа событий в определенное время суток (рисунок 9.5). В 2025 г. частота реализации всех сейсмических событий показала, что максимальное значение отмечено в 03, 20, 21 ч. (7), минимальное – в 11 ч. (0).

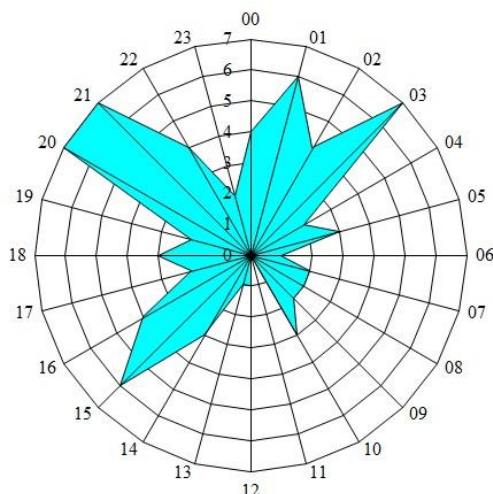


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2025 г. по часам суток

Далее представлено распределение всех землетрясений в 2025 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в воскресенье (21,8 %), а минимум – в четверг (5,1 %). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявления максимума в определенный день (рисунок 9.6).

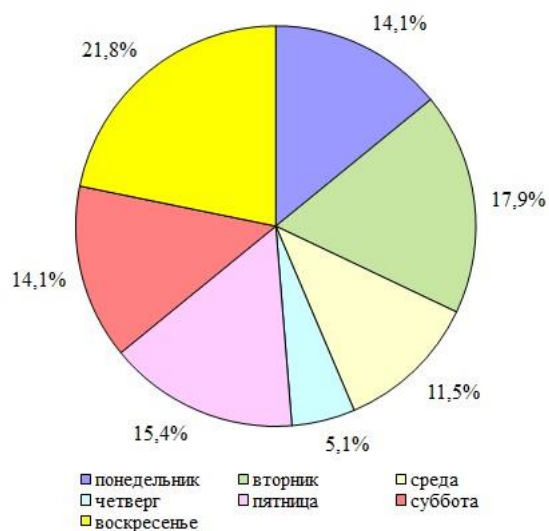


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2025 г.

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 2025 г. выполнено 305 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 2025 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 марте, апреле, июне, сентябре-ноябре, снижение происходило в феврале, мае, июле, августе и декабре.

Максимальное среднемесячное суммарное значение K -индексов отмечено в ноябре (24,9), а минимальное – в декабре (19,4). Среднегодовое значение (21,792) суммарных K -индексов в 2025 г. больше (на 3,073), чем в 2024 г. (18,719), и больше (в 1,235) среднего многолетнего значения (17,647) за 32 года (1993 – 2024 гг.).

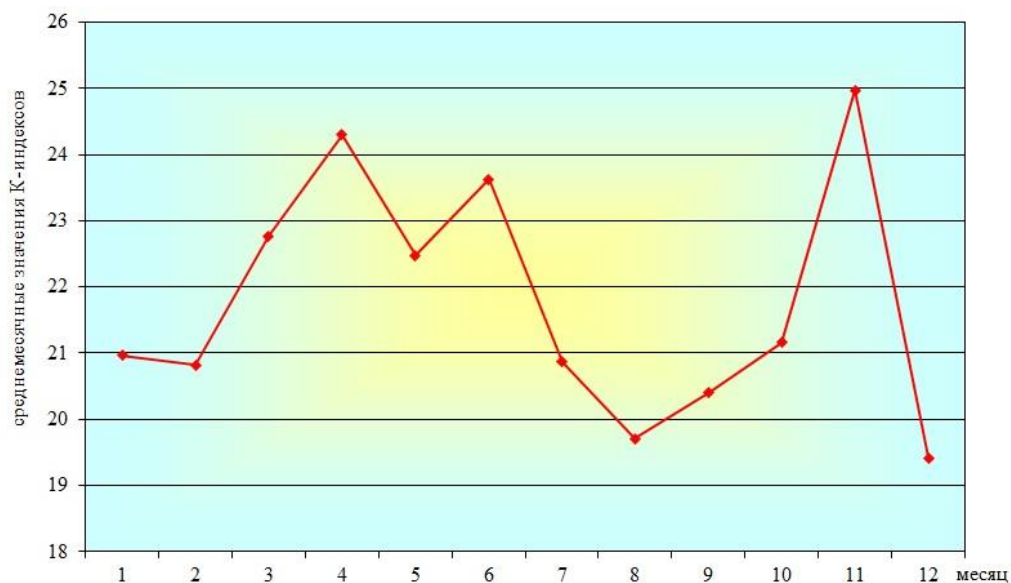


Рисунок 9.7 – График изменения среднемесячных значений суммарных K -индексов в 2025 г.

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 – 2025 гг., с небольшим снижением значений в 2024 г. Максимальные значения среднегодовых значений суммарных K -индексов (24) наблюдались в 2000, 2004, 2005 гг., минимальные значения (13) отмечены в 2009 и 2020 гг.

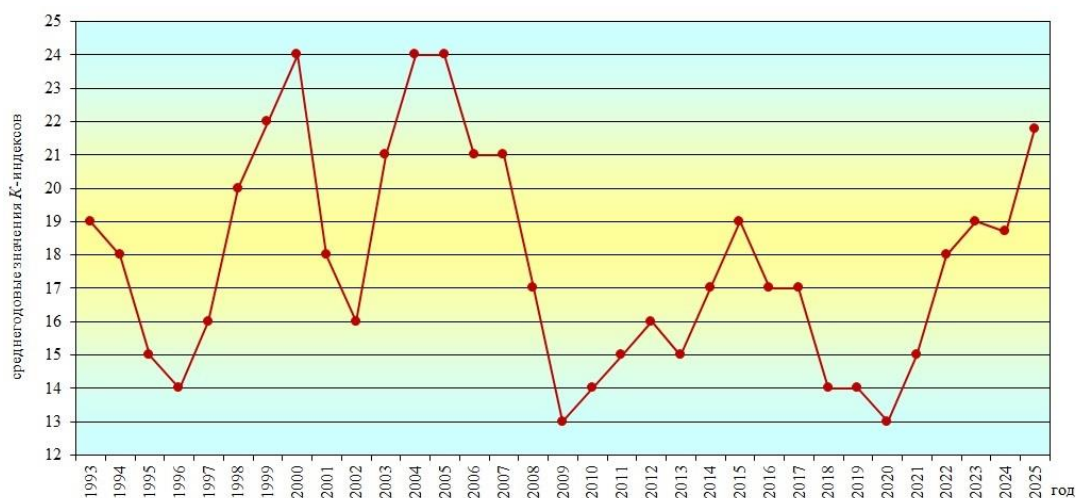


Рисунок 9.8 – График долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K -индексов за 1993 – 2025 гг.

В 2025 г. зафиксировано и обработано 80 магнитных бурь, из них 56 малых бурь (М), 17 умеренных бурь (У), 6 больших бурь (Б) и 1 очень большая буря (ОБ).

Далее представлена основная панель управления прибора LEMI-022 с записью очень большой магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 11 – 12 ноября 2025 г., продолжительность бури более 17 ч. 42 м. Во время этой бури на территории Республики Беларусь наблюдалось северное сияние (рисунок 9.9).

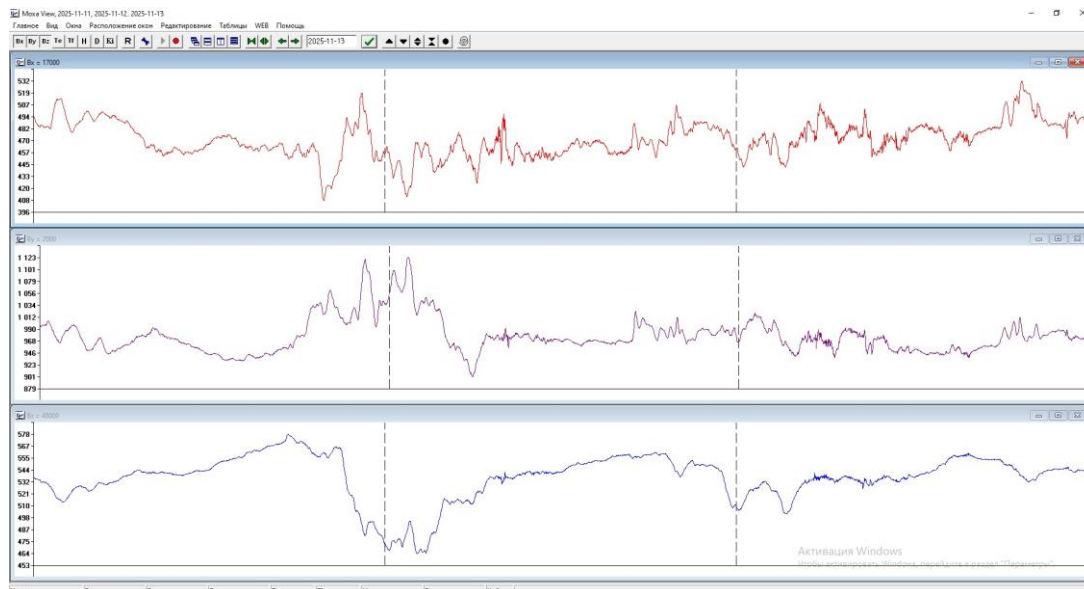


Рисунок 9.9 – Запись очень большой магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 11 – 12 ноября 2025 г.

Рост количества бурь наблюдался в феврале-мае и сентябре-ноябре, снижение происходило в июне-августе и декабре. Максимальное количество магнитных бурь (11) произошло в мае, а наименьшее (2) в январе (рисунок 9.10). В 2025 г. (80) геомагнитных бурь наблюдалось на 32 больше, чем в 2024 г. (48), и больше в 2,759 среднего многолетнего значения (29) за 32 года (1993 – 2024 гг.).

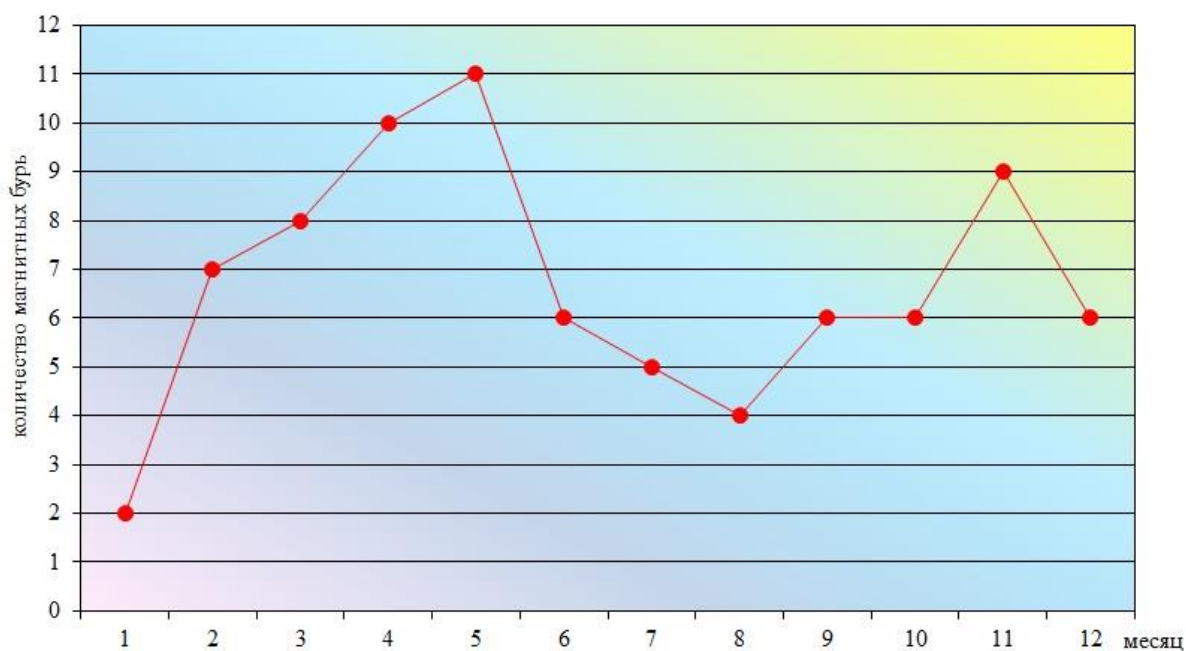


Рисунок 9.10 – График изменения числа магнитных бурь в 2025 г.

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, в 2023 – 2024 гг. наметилось небольшое снижение значений. В 2025 г. отмечено максимальное значение (80) за период наблюдений 1993 – 2025 гг. Рост значений с 2021 – 2025 гг. остается достаточно большим, что свидетельствует об активных возмущениях магнитного поля Земли, которые связаны с очередным периодом солнечной активности.

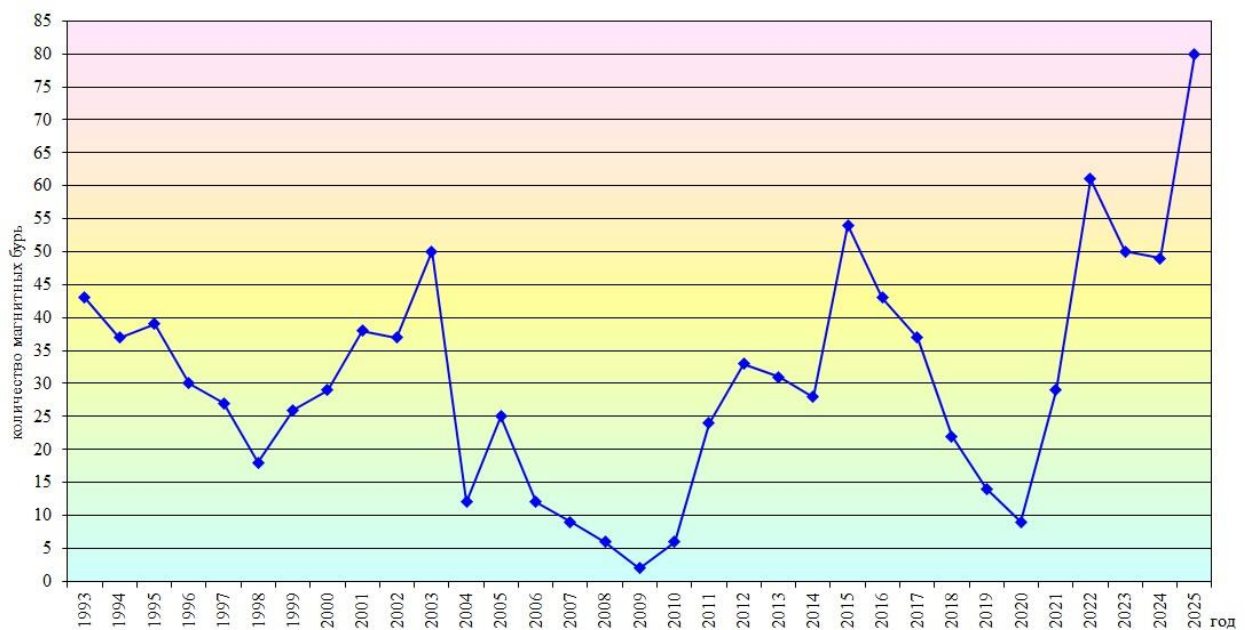


Рисунок 9.11 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993 – 2025 гг.

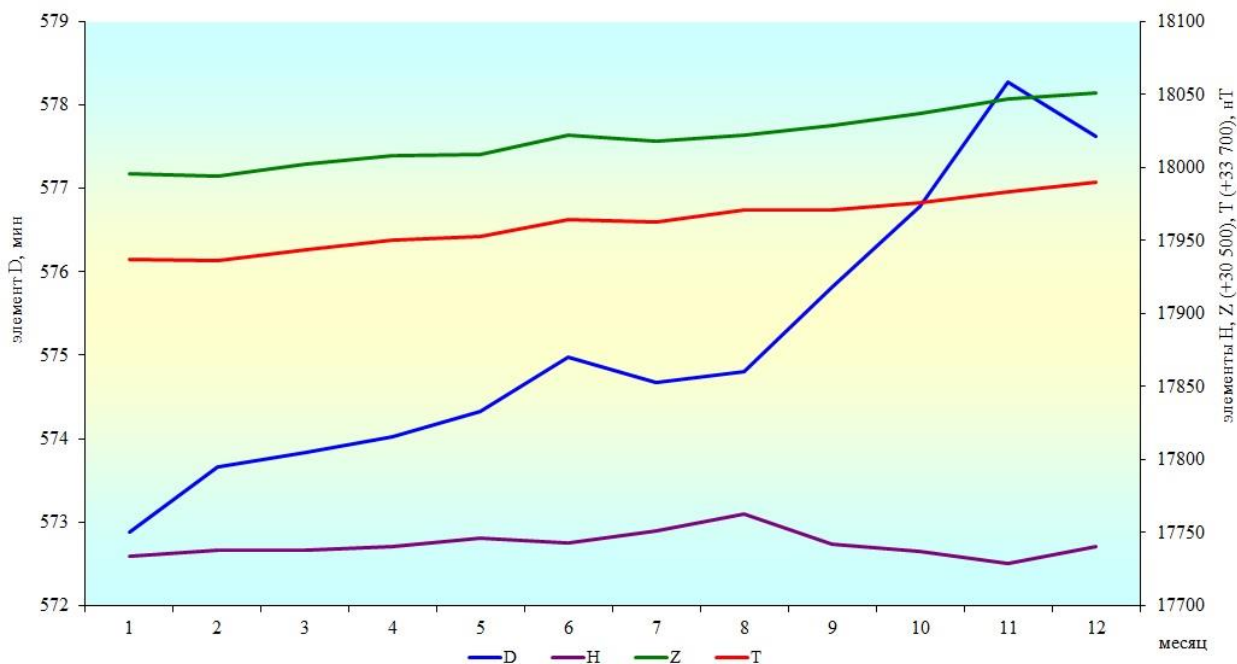
Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2025 г. составлен по изменению среднемесячных значений элементов D , H , Z , T . На протяжении всего года отмечался рост значений элемента D (угловая составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в июле-августе и декабре (рисунок 9.12). Максимальное значение (578,28 нТл) элемента D отмечено в ноябре, а минимальное – в январе (572,88 нТл). Среднегодовое значение (575,14) элемента D больше (на 5,67 нТл), чем в 2024 г. (569,47 нТл), и больше (в 121,97 нТл) среднего многолетнего значения (453,17 нТл) за 32 года (1993 – 2024 гг.).

Распределение значений элемента H (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило неравномерно (рисунок 9.12). Снижение отмечено в июне, сентябре-ноябре, а рост значений наблюдался в феврале-мае, июле-августе и декабре. Максимальное значение (17763 нТл) зафиксировано в августе, а минимальное – в ноябре (17729 нТл). Среднегодовое значение (17742 нТл) элемента H меньше (на 1 нТл), чем в 2024 г. (17743 нТл) и меньше (на 35 нТл) среднего многолетнего значения (17777 нТл).

На протяжении всего года отмечался рост значений элемента Z (вертикальная составляющая магнитного поля) с небольшим снижением в феврале и июле (рисунок 9.12). Максимальное значение (48551 нТл) отмечено в декабре, а минимальное –

в феврале (48494 нТл). Среднегодовое значение (48520 нТл) элемента Z больше (на 68 нТл), чем в 2024 г. (48452 нТл), и больше (на 844 нТл) среднего многолетнего значения (47676 нТл).

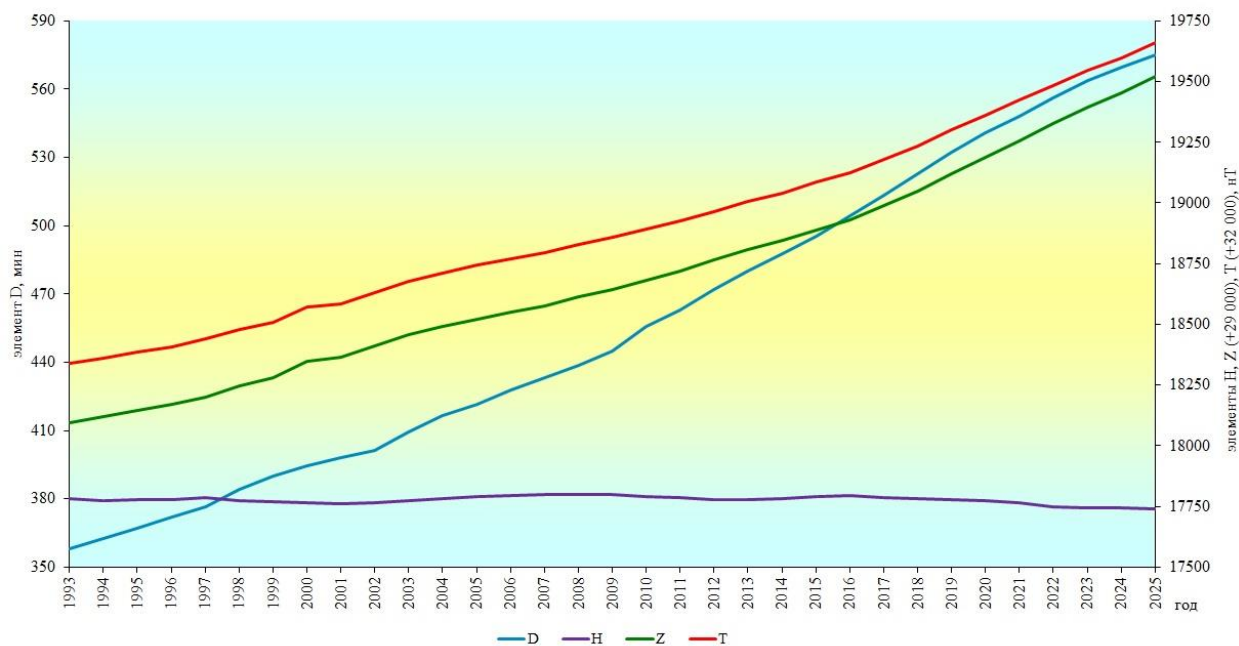
В течение года увеличивалось значение элемента T (полный вектор напряженности магнитного поля Земли) с небольшим замедлением роста в феврале и июле (рисунок 9.12). Максимальное значение (51690 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в феврале (51636 нТл). Среднегодовое значение (51662 нТл) элемента T больше (на 64 нТл), чем в 2024 г. (51598 нТл), и больше (на 779 нТл) среднего многолетнего значения (50883 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 2025 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 – 2025 гг. (рисунок 9.13). Вековой ход склонения D геомагнитного поля за период наблюдений составил рост значений в среднем (6,579) в год. Вековой ход вертикальной составляющей Z составляет (43,212 нТл) в год, а полного вектора T геомагнитного поля (40,121 нТл) в год. Вековой ход горизонтальной составляющей H геомагнитного поля показывает снижение значений в среднем (-1,152 нТл), который колеблется возле среднего многолетнего значения (17776,437 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 – 2025 гг.

Международное сравнение

Глобальный сейсмологический мониторинг. В 2025 г. сетью сейсмических станций Республики Беларусь зарегистрировано и обработано 7608 землетрясений в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 169 землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, в том числе 15 событий с $M \geq 7,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $mb=7,1$ и по поверхностной волне $M_s=8,2$ произошло 29 июля в 23 ч. 24 м. (UTC) у восточного побережья Камчатки. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2025 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 2025 г. наибольшее число землетрясений (856) зафиксировано в августе, а наименьшее (486) в мае (рисунок 9.14). Количество произошедших землетрясений (7608) больше (на 2117), чем в 2024 г. (5491), и больше (в 4,239) среднего многолетнего значения (1794,656) за 32 года (1993 – 2024 гг.).

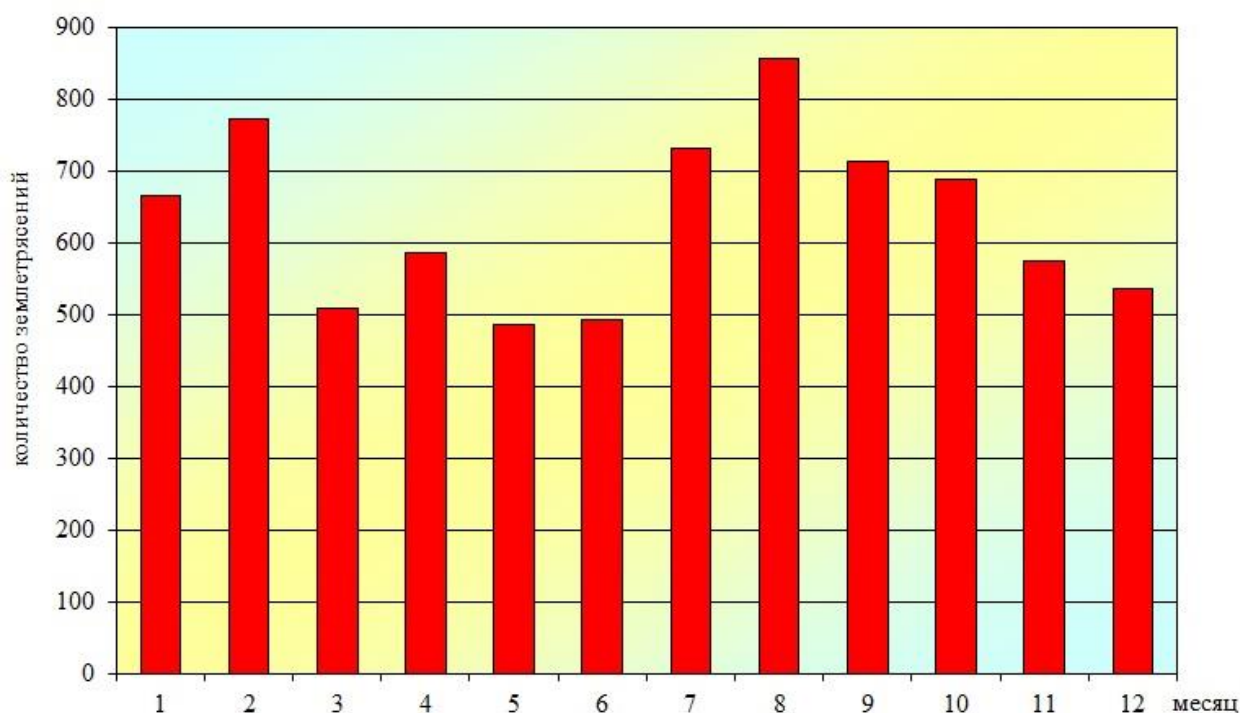


Рисунок 9.14 – График изменения количества землетрясений Земли в 2025 г.

На рисунке представлен долговременный график количества землетрясений по годам за период с 1993 по 2025 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 – 2025 гг. – 2025 г. (7608). За период наблюдений максимальное число землетрясений отмечено в 2025 г. (7608), а минимальное – в 1998 г. (854).

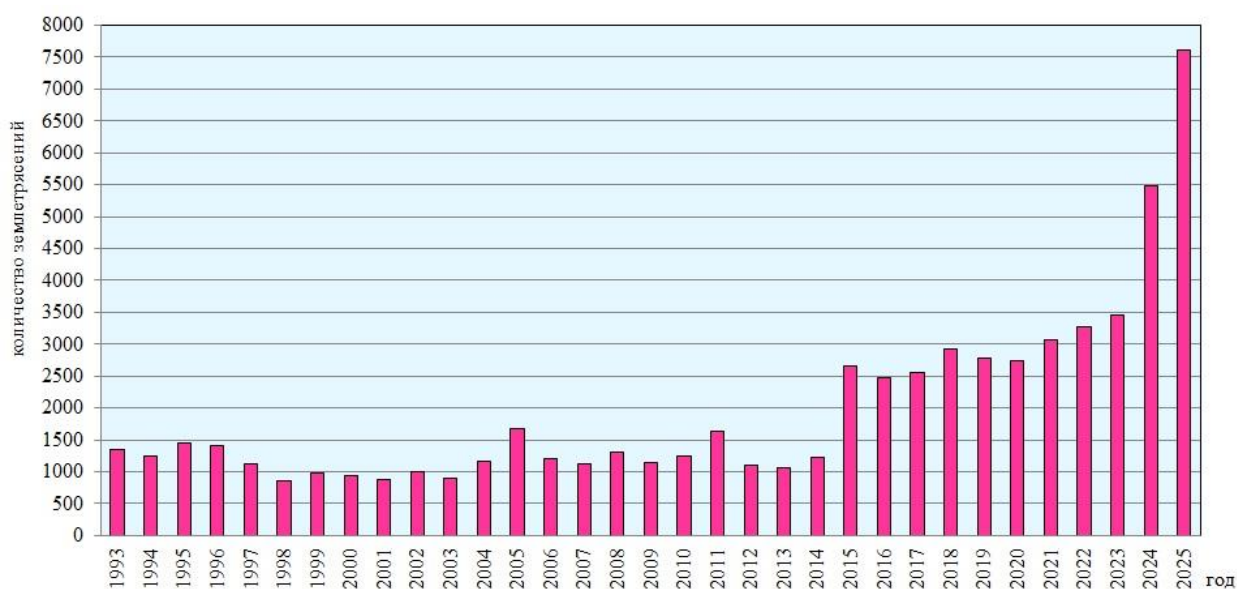


Рисунок 9.15 – График изменения во времени количества землетрясений Земли за 1993 – 2025 гг.

Региональный сейсмологический мониторинг. На территории Европы и смежных областях в 2025 г. зарегистрировано 1101 землетрясение с магнитудой $M \geq 3,0$, из них 80 событий с $M \geq 5,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $m_b = 6,5$ произошло 21 мая в 03 ч. 19 м. (UTC) 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 (201) произошло в феврале, а наименьшее (59) – в январе (рисунок 9.16). В 2025 г. произошло на 453 землетрясения больше, чем в 2024 г. (648), и больше (в 1,724) среднего многолетнего значения (638,500) за 32 года (1993 – 2024 гг.).

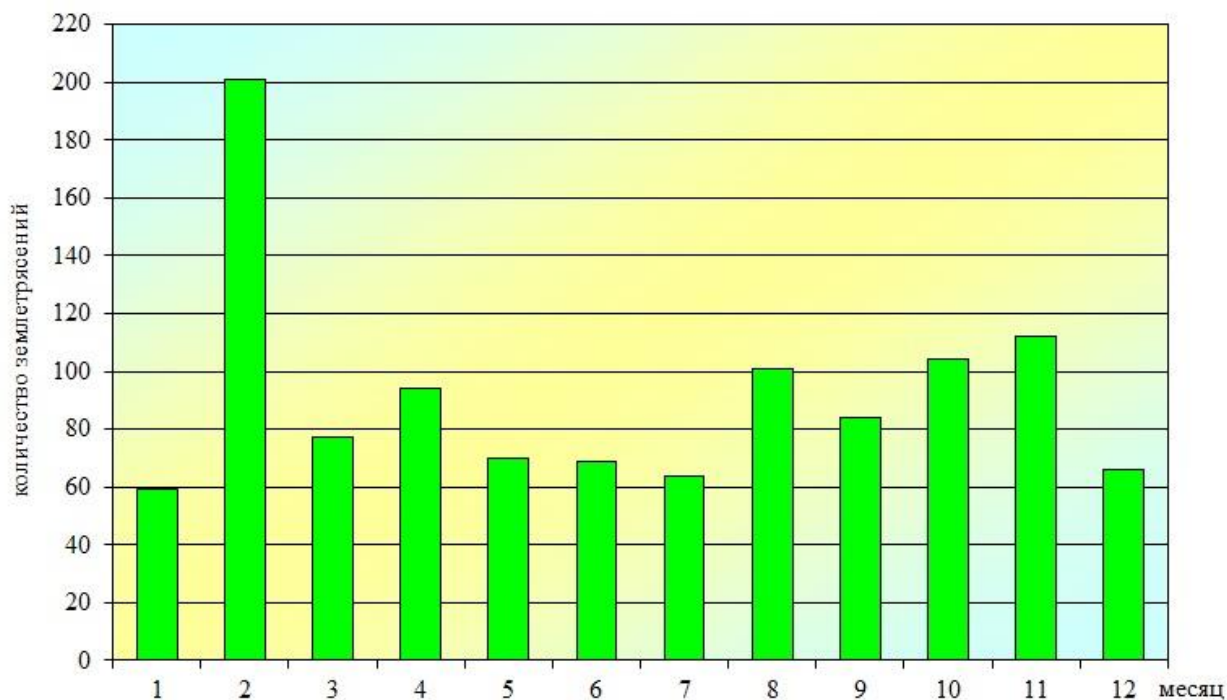


Рисунок 9.16 – График изменения количества землетрясений Европы и смежных областей в 2025 г.

На рисунке представлен долговременный график хода количества землетрясений на территории Европы и смежных областей с магнитудами $M \geq 3,0$ за период 1993 – 2025 гг. Анализ долговременного проявления сейсмического процесса показал, что тенденция нарастания числа землетрясений с 1993 г. достигла своего максимума в 2006 г. (987), 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 (1439), 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 (1269), связанный с афтершоковой активностью. В 2024 г. активность сократилась почти в два раза, затем в 2025 г. наметился рост значений. За период наблюдений максимальное число землетрясений отмечено в 2015 г. (1439), а минимальное – в 1994 г. (118).

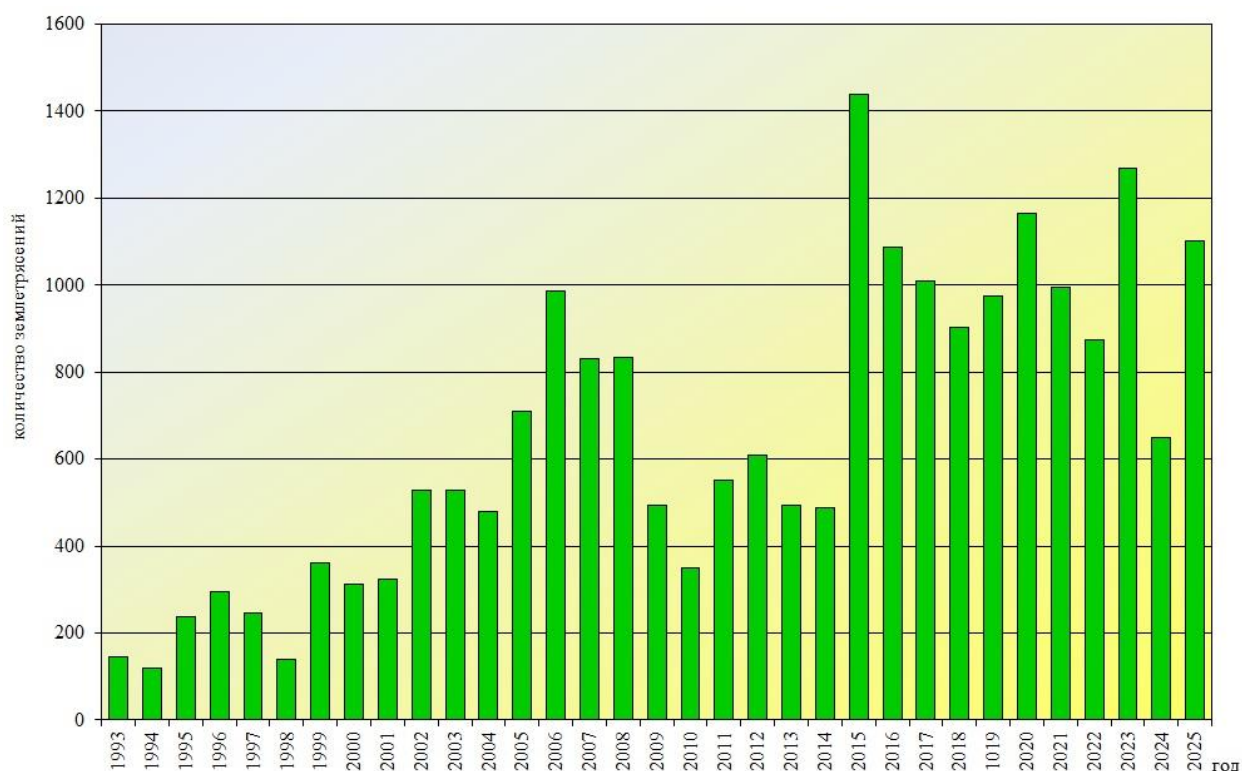


Рисунок 9.17 – График изменения во времени количества землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой $M \geq 3,0$ за 1993 – 2025 гг.

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 – 2025 гг. (рисунок 9.18).

Анализ сейсмичности показал, что на территории Земли максимальное число землетрясений (7608) зафиксировано в 2025 г., а минимальное (854) – в 1998 г. На территории Европы и смежных областей 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.

Установлено, 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 2025 г. наблюдался значительный рост числа зафиксированных землетрясений на территории Земли и Европы. В Республике Беларусь в 2025 г. сейсмичность незначительно увеличилась как по отношению к 2024 г., так и к средним долгосрочным значениям.

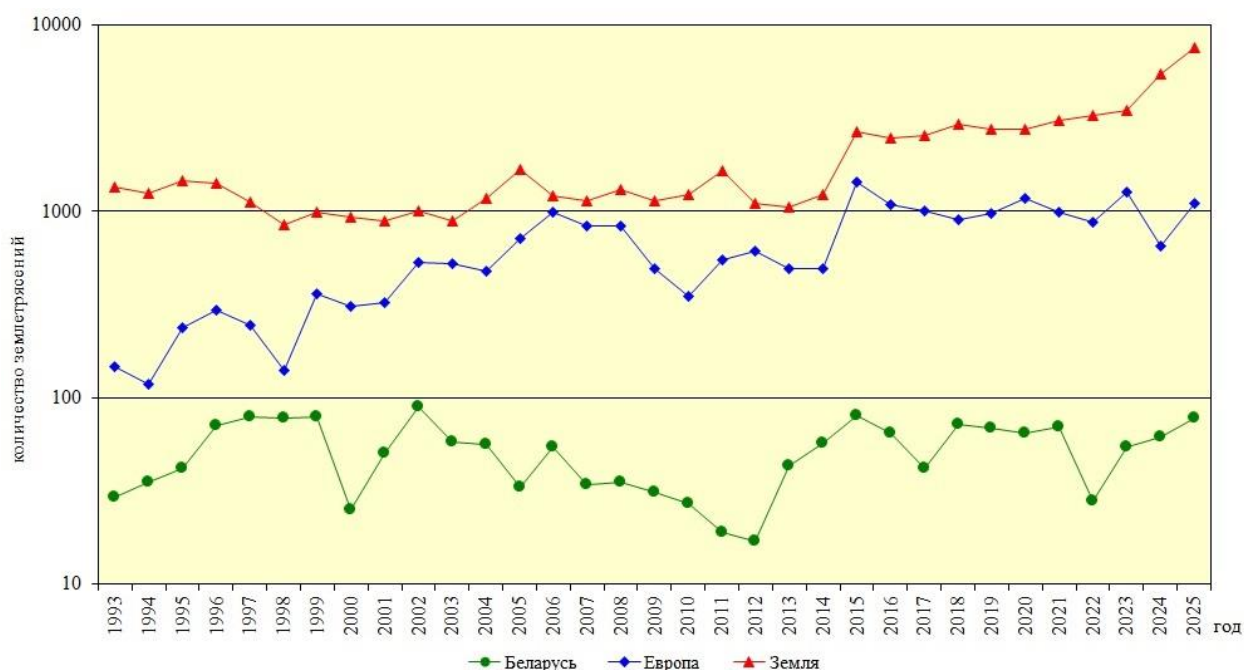


Рисунок 9.18 – График временного хода числа землетрясений на территории Земли, Европы и Республики Беларусь за период 1993 – 2025 гг.

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.