

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 [39, 56].

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.

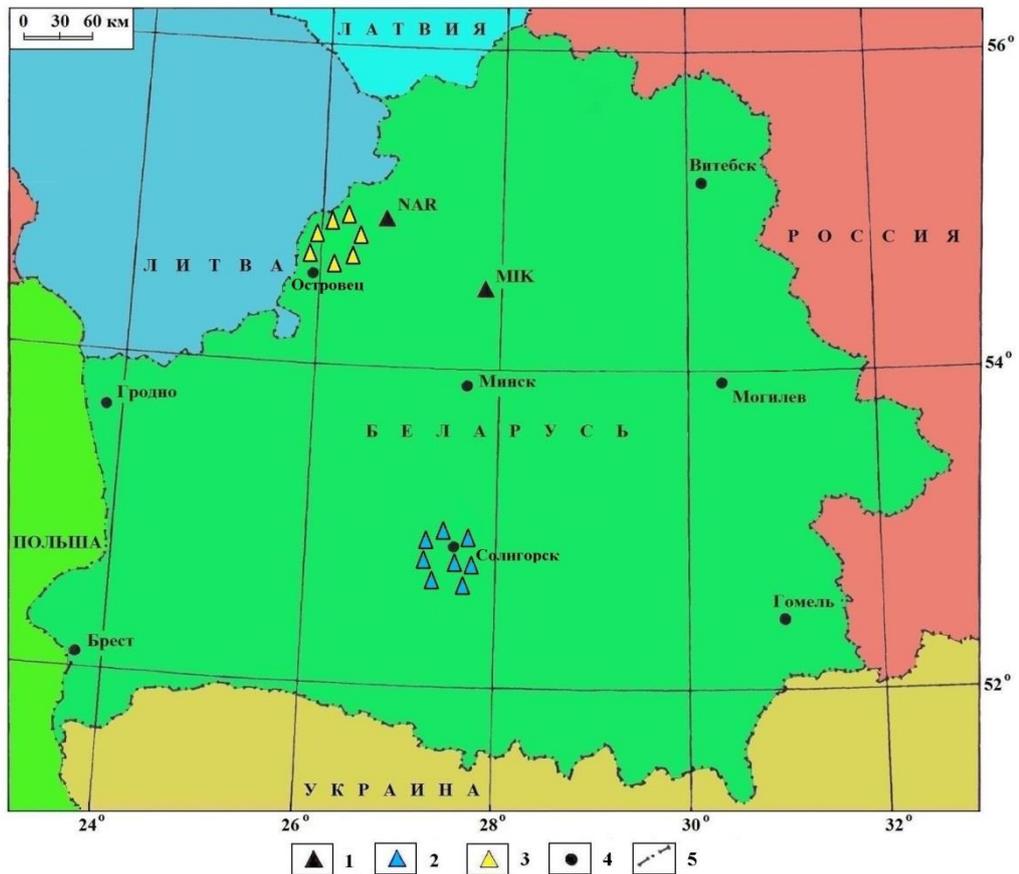
Сеть геофизического мониторинга Беларуси структурно состоит из трех уровней: глобальный, региональный и локальный. Глобальный и региональные уровни мониторинга обеспечивают геофизические обсерватории «Плещеницы» и «Нарочь»; региональный и локальный – сети сейсмических станций в Солигорском и Островецком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

В 2021 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», «Новый луг», «Махновичи», «Листопадовичи»); в Островецком районе (семь сейсмических станций: «Бояры», «Градовщица», «Вадатишки», «Селище», «Горная Каймина», «Воробы», «Литвяны») (рисунок 9.1).

Основной посыл и выводы

Количество зарегистрированных землетрясений в 2021 г. на глобальном уровне составляет 3069 событий, на региональном – 996 и локальном – 70 землетрясений. Анализ сейсмичности показал, что уровень сейсмической активности в 2021 г. повысился по отношению к 2020 г. на глобальном и локальном уровнях, понизился на региональном, при этом остается повышенным по отношению к средним многолетним значениям.

В 2021 г. геомагнитной обсерваторией зафиксировано 29 магнитных бурь, среднегодовое значение суммарных K -индексов составляет 15,17. Определены среднегодовые значения векового хода элементов D (548,08), H (17764), Z (48257,42), T (51423,08) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли в 2021 г. был выше предыдущего года, и остается повышенным к средним многолетним значениям предыдущих годов, кроме значений элемента H .



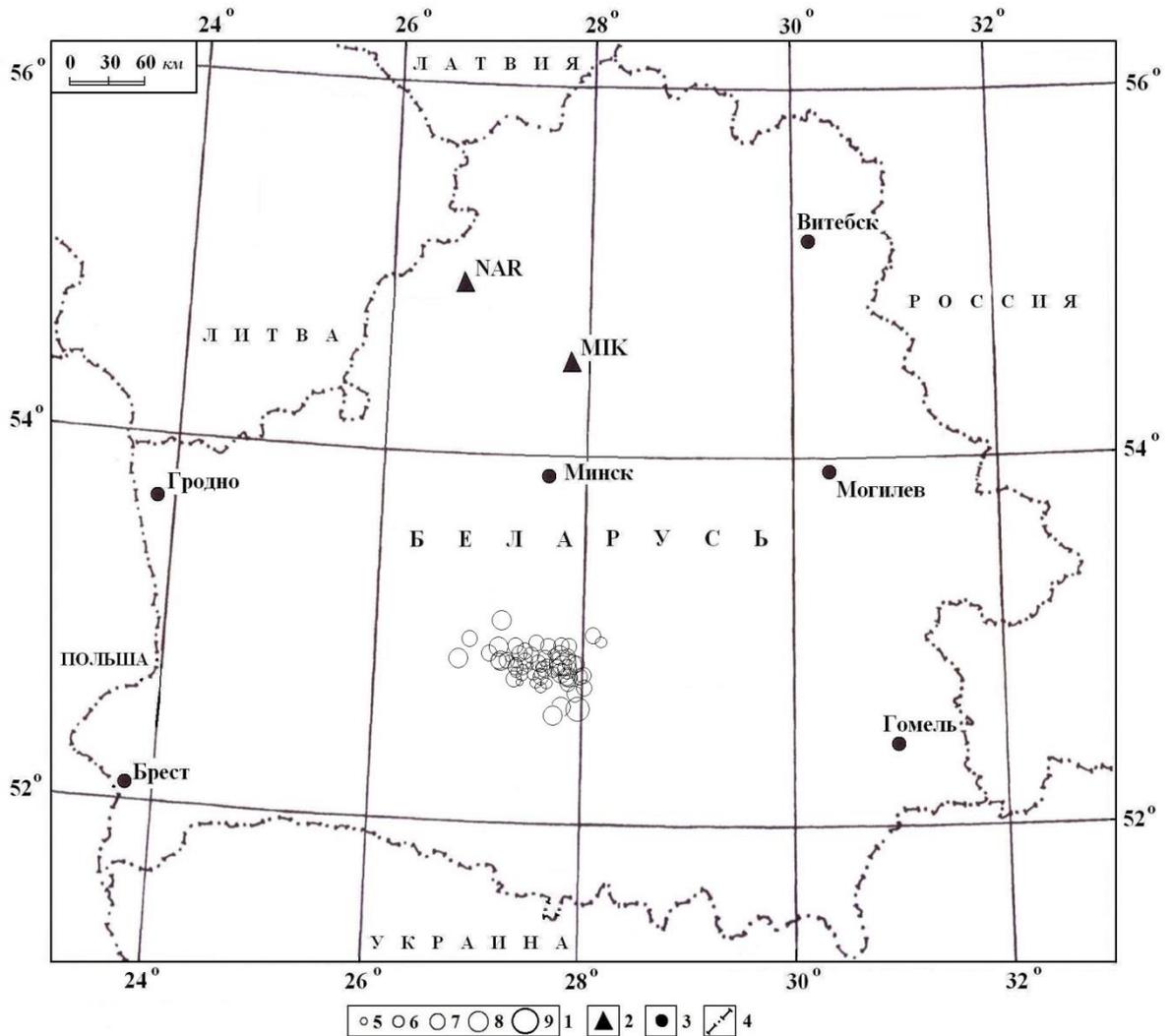
Условные обозначения: 1 – пункты наблюдений: геофизические обсерватории «Плещеницы» – МИК и «Нарочь» – NAR; 2 – Солигорская локальная сейсмическая сеть; 3 – Островецкая локальная сейсмическая сеть; 4 – город; 5 – государственная граница

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 2021 г. зарегистрировано 70 землетрясений энергетического диапазона $K=4,6-9,2$ или в единицах локальной магнитуды $M=0,3-2,9$. Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с $M=2,9$ ($K=9,2$) произошло 3 сентября (23-38), а наименьшее с $M=0,3$ ($K=4,6$) произошло 4 июля (16-00). 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, 2021 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило не равномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ($2,7764 \cdot 10^9$ Дж) наблюдалось в сентябре, а минимальное значение ($0,0127 \cdot 10^9$ Дж) отмечено в июле. Максимальное число произошедших сейсмических событий (9) зафиксировано в феврале, а минимальное число событий (2) отмечено в октябре.

В 2021 г. наблюдалось повышение (на 2,052) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии ($\Sigma E=3,7748 \cdot 10^9$ Дж) по сравнению с 2020 г. ($\Sigma E=1,7228 \cdot 10^9$ Дж), и увеличение (в 2,135) среднего многолетнего значения ($\Sigma E=1,7678 \cdot 10^9$ Дж) за 28 лет (1993 – 2020). Количество произошедших сейсмических событий (70) больше (на 6), чем 2020 г. (64), и больше (в 1,368) среднего многолетнего значения ($N_{\Sigma}=51,179$) за 28 лет.

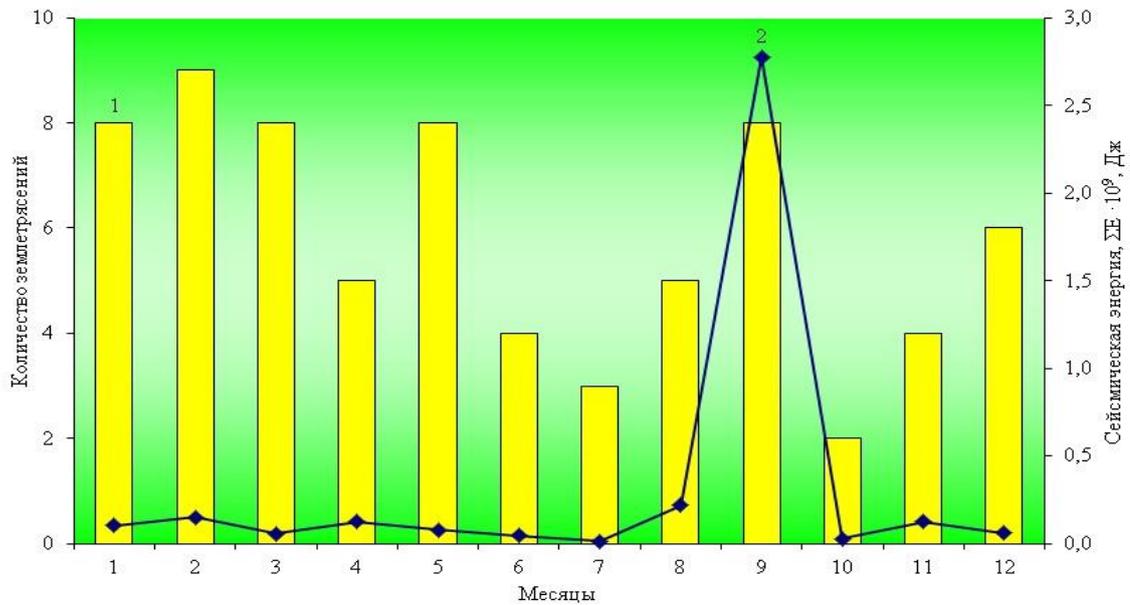


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2021 г.

На рисунке 9.4 представлено многолетнее распределение числа землетрясений и суммарной выделившейся сейсмической энергии по годам за период наблюдений 1993 – 2021 гг. Анализ долговременного проявления сейсмического процесса на территории Беларуси показал, что максимальные значения суммарной выделившейся сейсмической энергии наблюдались в 1996 г. и 1999 г., минимальные отмечены в 2010 – 2012 гг. Максимальные числа произошедших сейсмических событий отмечены в 1997 – 1999 гг., 2002 г. и 2015 г. В 2021 г. произошло увеличение выделившейся суммарной сейсмической энергии и возросло количество произошедших сейсмических событий.

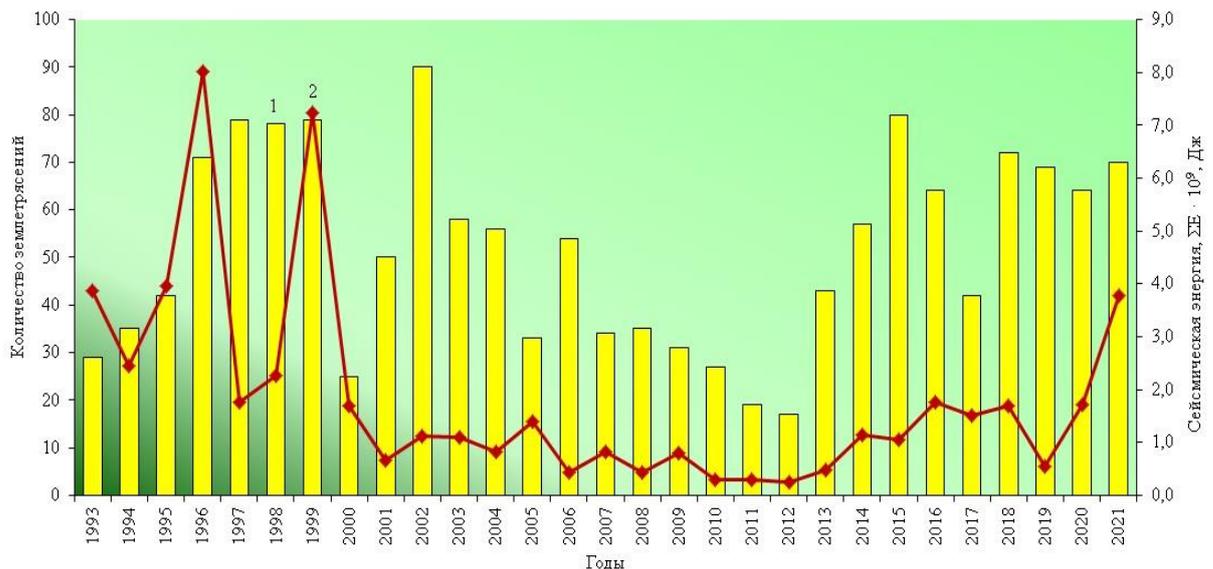


Рисунок 9.4 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993 – 2021 г.

На рисунке 9.5 показана частота реализации всех сейсмических событий за 2021 г. в течение суток с периодами повышения числа событий в ночное время – 23-00 (8), в дневное время – 17-00, 18-00 и 20-00 (5). Анализ частоты реализации сейсмических

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

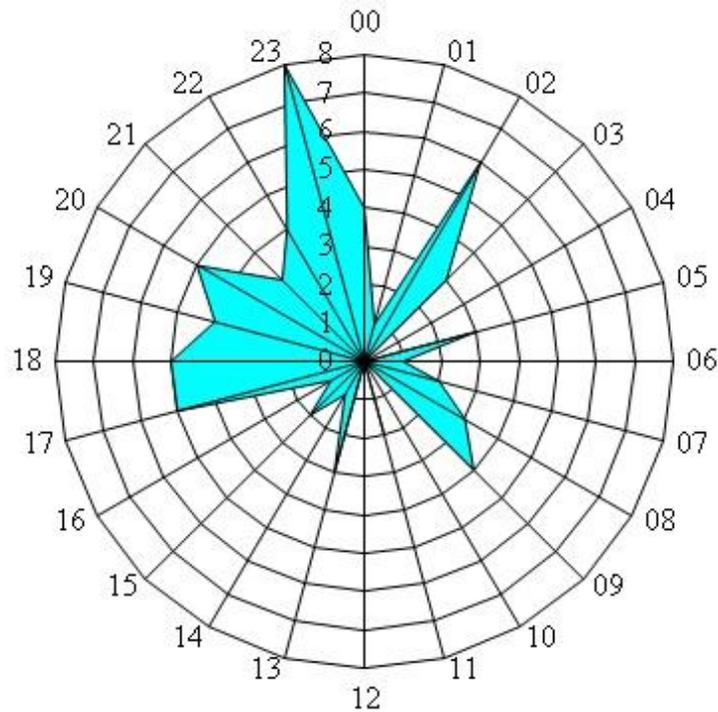


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2021 г. по часам суток

На рисунке 9.6 показано распределение всех землетрясений за 2021 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в воскресенье (13), а минимум в субботу (7). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявление максимума в определенный день.

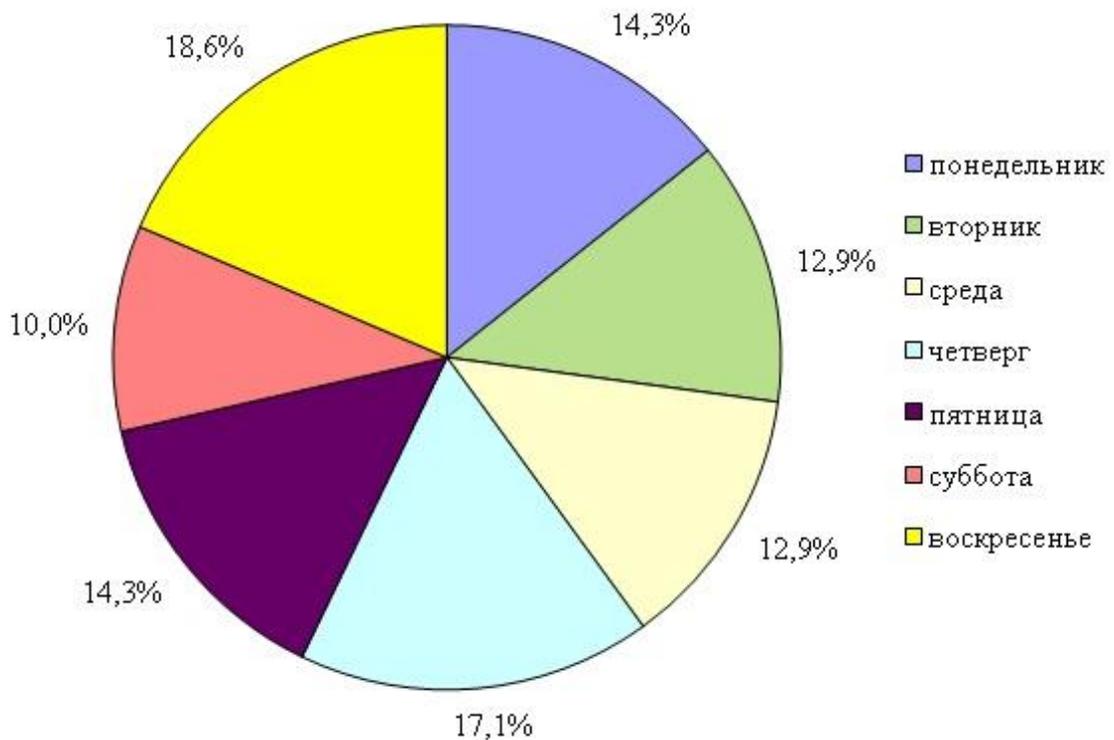


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2021 г.

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 2021 г. выполнено 37 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 2021 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). Максимальное среднемесячное суммарное значение K -индексов отмечено в марте (17,4), а минимальное – в январе (11,4). Среднегодовое значение (15,17) суммарных K -индексов за 2021 г. меньше (на 2,05), чем в 2020 г. (13,12) и меньше (в 1,16) среднего многолетнего значения (17,64) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

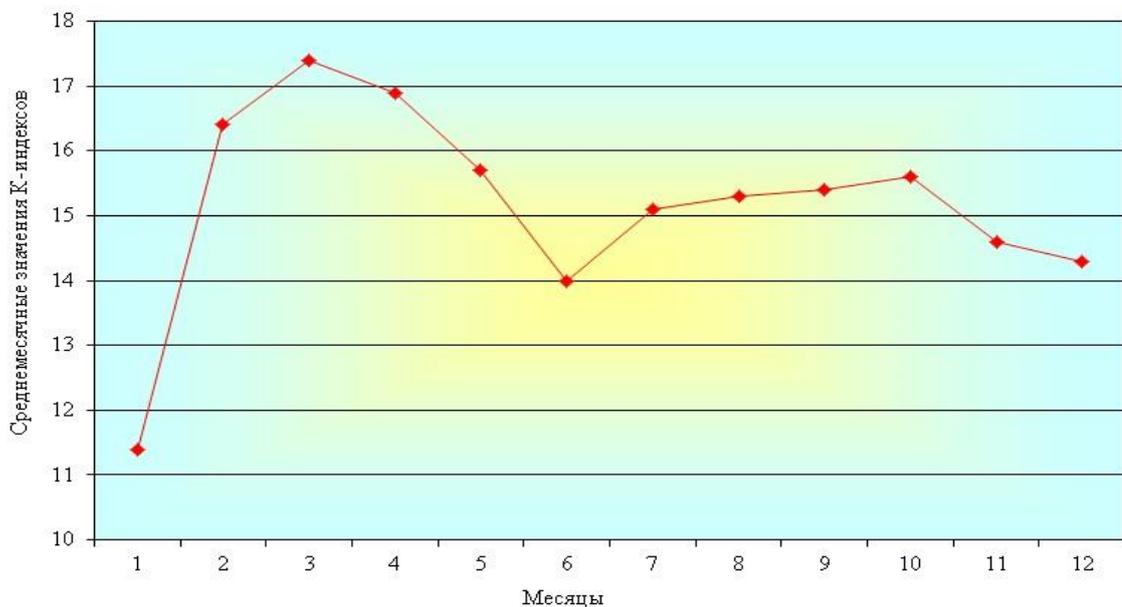


Рисунок 9.7 – График изменения среднемесячных значений суммарных K -индексов в 2021 г.

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 г., 2004 г., 2005 г., минимальные значения (13) отмечено в 2009 г. и 2020 г. В 2021 г. наметился рост среднегодовых значений суммарных K -индексов, возможно, это начало следующего активного периода.

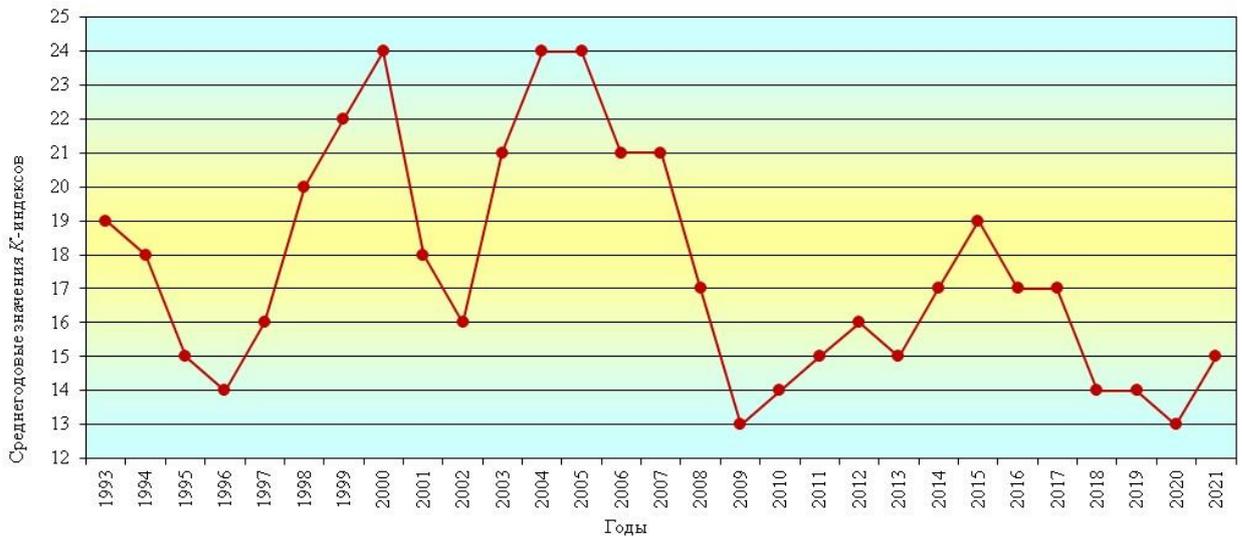


Рисунок 9.8 – График долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K-индексов за 1993 – 2021 гг.

В 2021 г. зафиксировано и обработано 29 магнитных бурь. По типу магнитные бури определены как: 26 малых бурь (*M*), 2 умеренных (*У*) и 1 большая (*B*).

На рисунке 9.9 показана основная панель управления прибора LEMI-022 с записью большой магнитной бури, произошедшей 3 ноября 2021 г., продолжительность бури 25 часов.

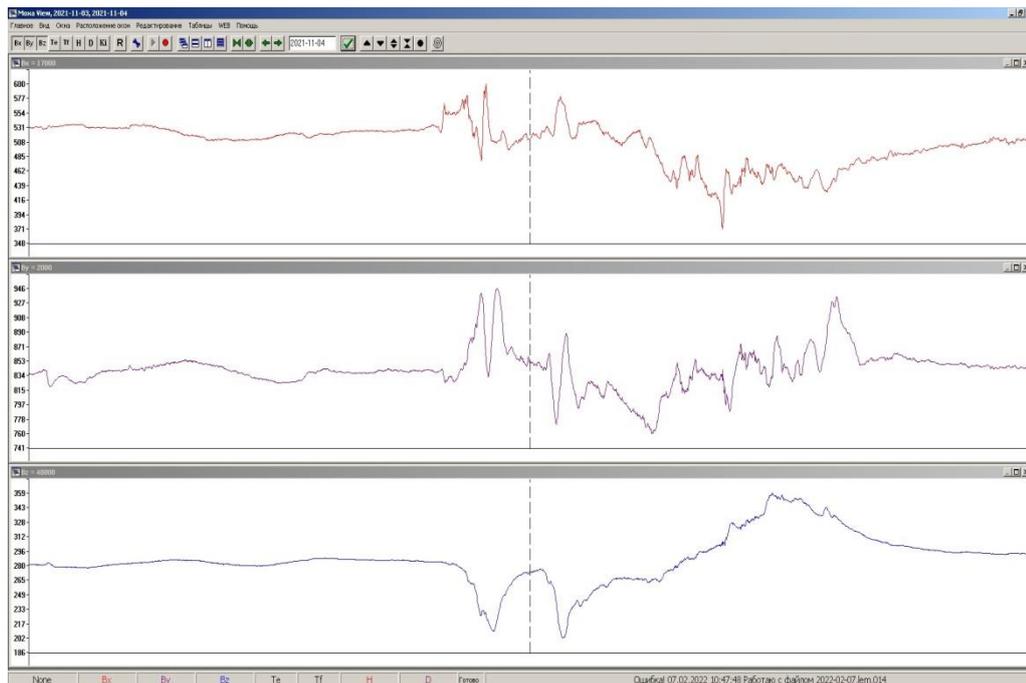


Рисунок 9.9 – Запись большой магнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 03.11.2021 г.

Наибольшее количество магнитных бурь (4) произошло в марте, а наименьшее (1) в июле и декабре (рисунок 9.10). В 2021 г. произошло на 20 магнитных бурь больше, чем в 2020 г. (9), и больше (в 1,09) среднего многолетнего значения (26,46) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

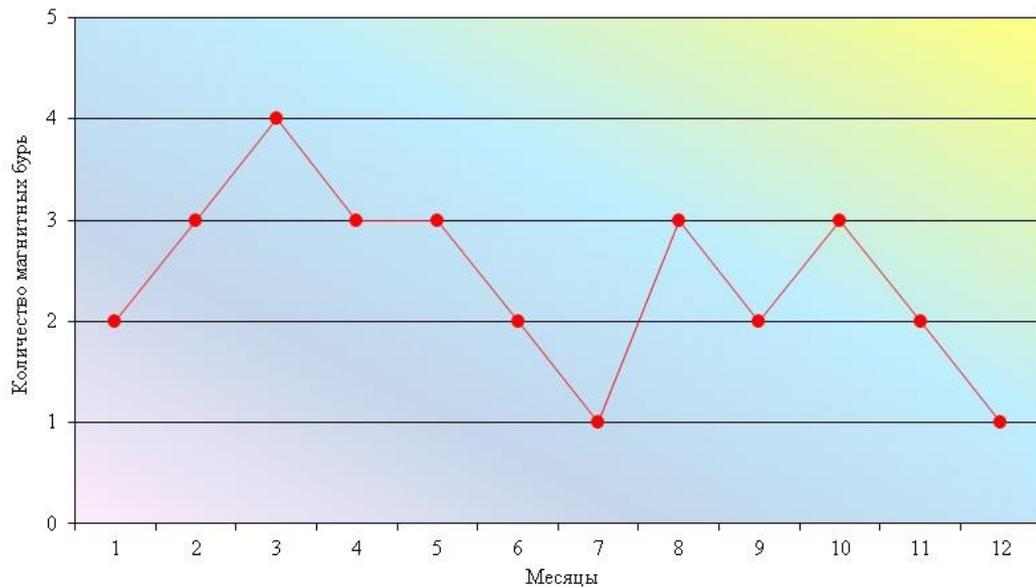


Рисунок 9.10 – График изменения числа магнитных бурь в 2021 г.

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 настоящее время наблюдается активизация возмущений магнитного поля Земли, которая связана с началом очередного периода солнечной активности.

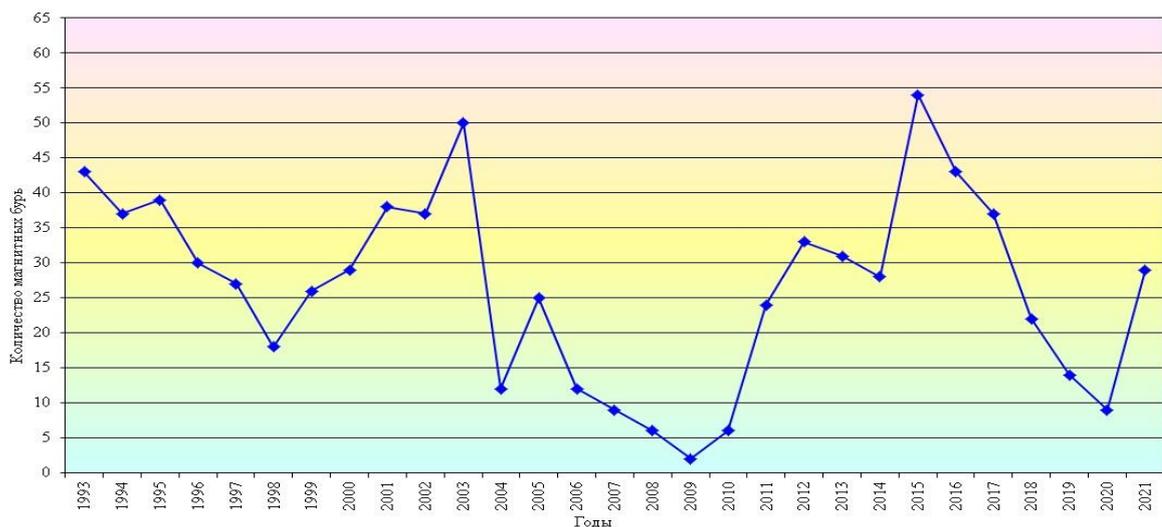


Рисунок 9.11 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993 – 2021 гг.

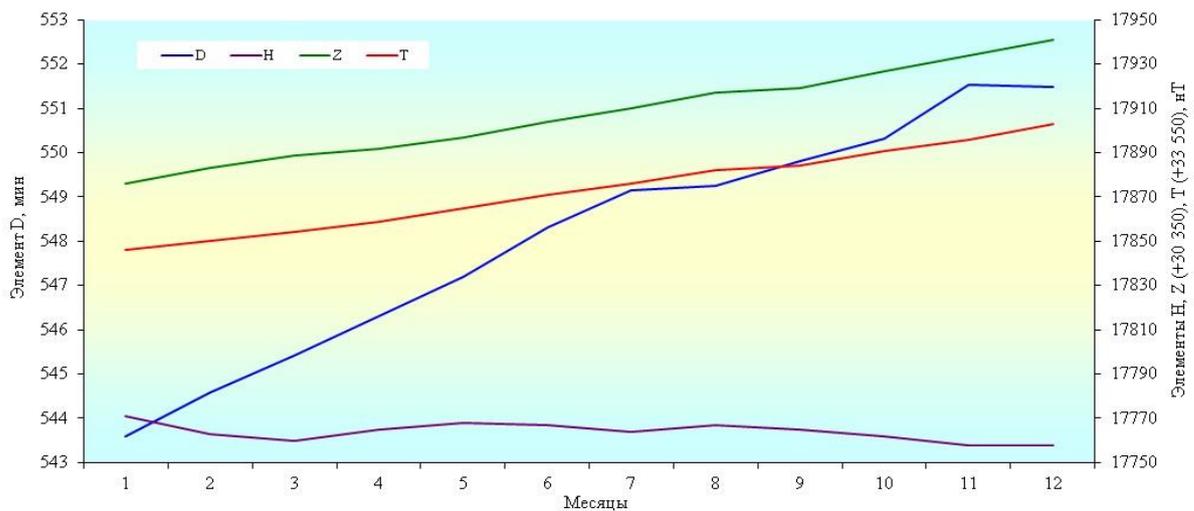
Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2021 г. составлен по изменению среднемесячных значений элементов D , H , Z , T . На протяжении всего года отмечался рост значений элемента D (угловая составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в августе и незначительным снижением в декабре (рисунок 9.12). Максимальное значение (551,526 нТл) элемента D отмечено в ноябре, а минимальное – в январе

(543,588 нТл). Среднегодовое значение (548,078 нТл) элемента D больше (на 110,075 нТл) среднего многолетнего значения (438,003 нТл) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

Распределение значений элемента H (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило не равномерно (рисунок 9.12). Снижение отмечено в феврале, марте, июне, июле, сентябре-ноябре, а рост значений наблюдался в апреле, мае и августе. Максимальное значение (17771 нТл) зафиксировано в январе, а минимальное – в ноябре и декабре (17758 нТл). Среднегодовое значение (17764 нТл) элемента H меньше (на 17,443 нТл) среднего многолетнего значения (17781,443 нТл) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

На протяжении 2020 г. отмечался рост значений элемента Z (вертикальная составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в сентябре (рисунок 9.12). Максимальное значение (48291 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (48226 нТл). Среднегодовое значение (48257,417 нТл) элемента Z больше (на 678,39 нТл) среднего многолетнего значения (47579,027 нТл) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

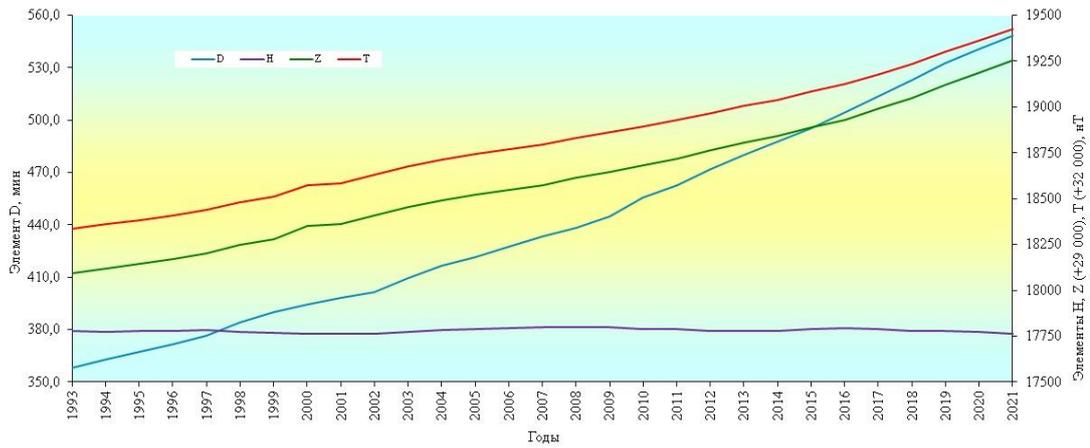
В течение года увеличивалось значение элемента T (полный вектор напряженности магнитного поля Земли) с небольшим замедлением роста в сентябре (рисунок 9.12). Максимальное значение (51453 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (51396 нТл). Среднегодовое значение (51423,083 нТл) элемента T больше (на 629,836 нТл) среднего многолетнего значения (50793,247 нТл) за 28 лет (1993 – 2020 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 2021 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 – 2021 гг. Вековой ход склонения D геомагнитного поля за период наблюдений составил в среднем (6,555) в год. Вековой ход вертикальной составляющей Z составляет (40,103 нТл) в год, а полного вектора T геомагнитного поля (37,414 нТл) в год. Вековой ход горизонтальной составляющей H геомагнитного поля составляет в среднем (- 0,552 нТл), вековой ход колеблется возле значения (17781 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 – 2021 гг.

Международное сравнение

Глобальный сейсмологический мониторинг. В 2021 г. сетью сейсмических станций Беларуси зарегистрировано и обработано 3069 землетрясений в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 155 землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, в том числе 20 событий с $M \geq 7,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $mb=7,3$ и по поверхностной волне $M_s=8,2$ произошло 29 июля (06-15) на полуострове Аляска. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2021 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 2021 г. наибольшее число землетрясений (464) зафиксировано в марте, а наименьшее (191) в октябре (рисунок 9.14). Количество произошедших землетрясений (3069) больше (на 327), чем в 2020 г. (2742), и больше (в 2,039) среднего многолетнего значения (1505,107) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

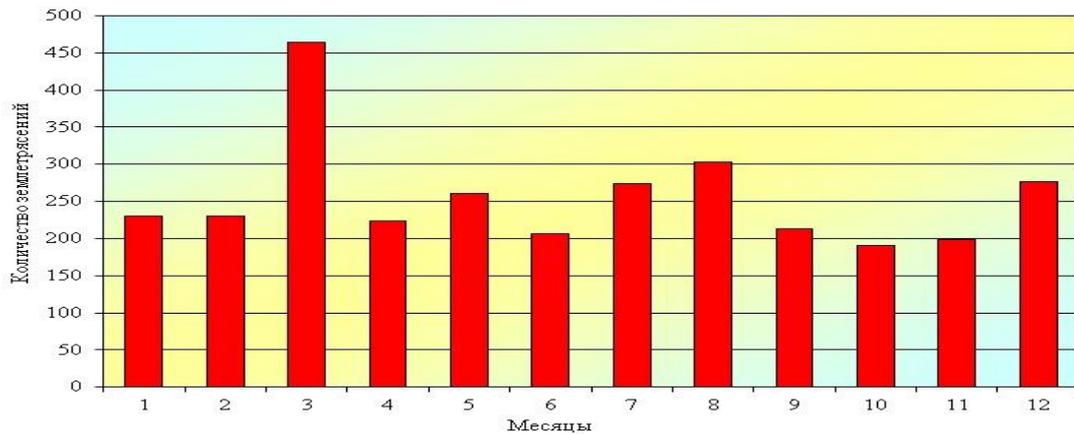


Рисунок 9.14 – График изменения количества землетрясений Земли в 2021 г.

На рисунке 9.15 представлен долговременный график количества землетрясений по годам за период 1993 – 2021 гг. Наблюдались 3 активных периода: с 1993 по 1996 гг. с максимумом землетрясений в 1995 г. (1450); с 2005 по 2011 гг. – в 2005 г. (1674); с 2015 по 2021 гг. – в 2021 г. (3069). Минимальное число землетрясений наблюдалось в 1998 г. (854), 2001 г. (886) и 2003 г. (895).

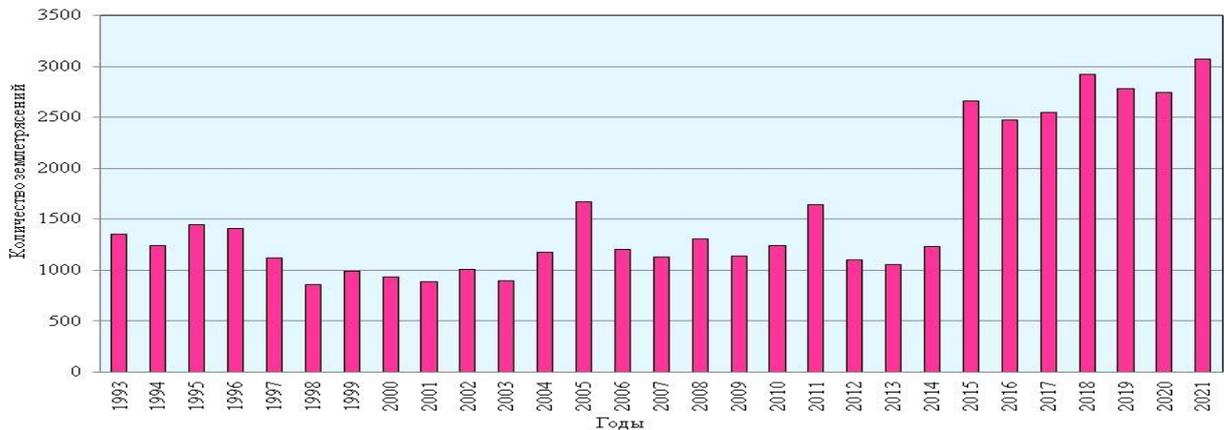


Рисунок 9.15 – График изменения во времени количества землетрясений Земли за 1993 – 2021 гг.

Региональный сейсмологический мониторинг. На территории Европы и смежных областях в 2021 г. зарегистрировано 996 землетрясений с магнитудой $M \geq 3,0$, из них 49 событий с $M \geq 5,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой по продольной волне $m_b=6,4$ и с магнитудой по поверхностной волне $M_s=6,2$ произошло 12 октября (09-24) на острове 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 внуконтинентальной и океанической частям.

В течение года наибольшее количество землетрясений (122) произошло в марте, а наименьшее (50) в мае (рисунок 9.16). В 2021 г. отмечено (на 170) землетрясений меньше, чем в 2020 г. (1166) и больше (в 1,676) среднего многолетнего значения (594,429) за 28 лет (1993 – 2020 гг.).

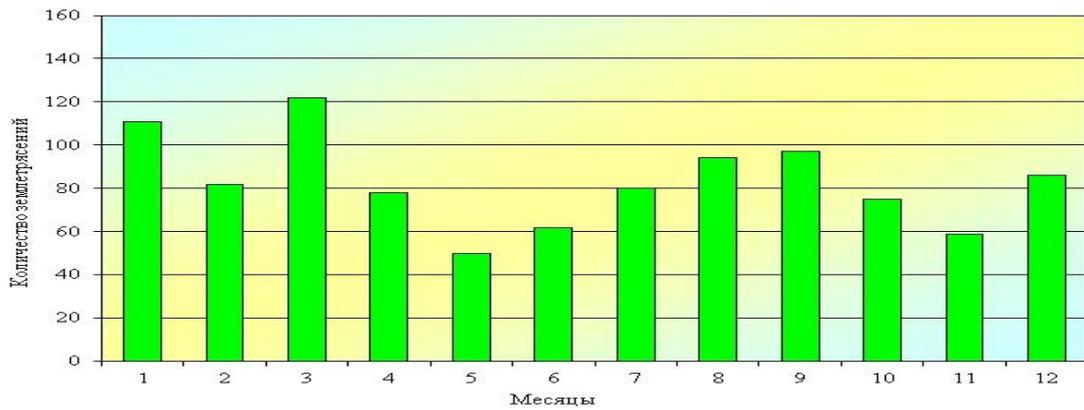


Рисунок 9.16 – График изменения количества землетрясений Европы и смежных областей в 2021 г.

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 – 2021 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 году произошел спад активности.

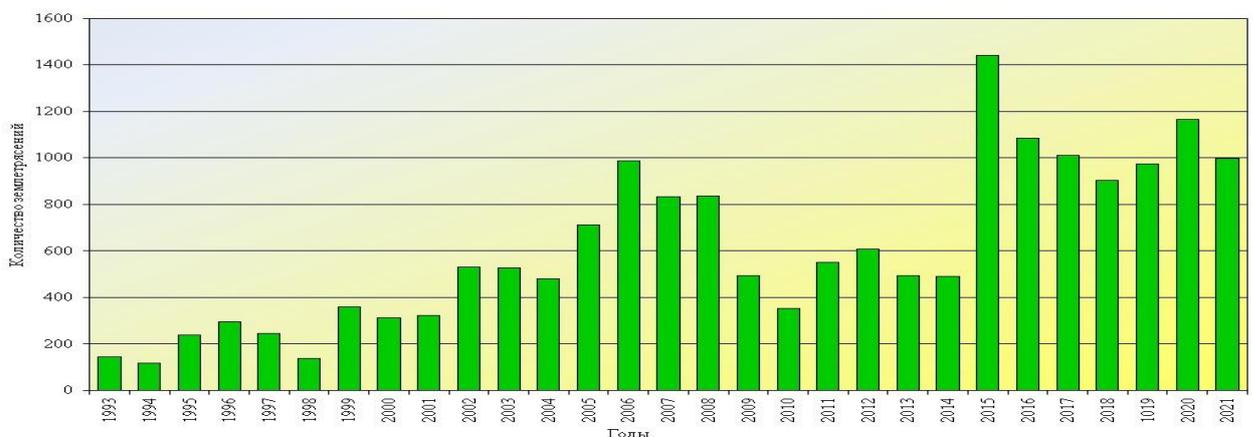


Рисунок 9.17 – График изменения во времени количества землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой $M \geq 3,0$ за 1993 – 2021 гг.

Комплексный анализ параметров сейсмичности. На основе анализа и обобщения сейсмологического мониторинга территории Земли, Европы и Беларуси выполнен комплексный анализ параметров сейсмичности за период 1993–2021 гг. (рисунок 9.18).

Анализ сейсмичности показал, что на территории Земли максимальное число землетрясений (3069) зафиксировано в 2021 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.

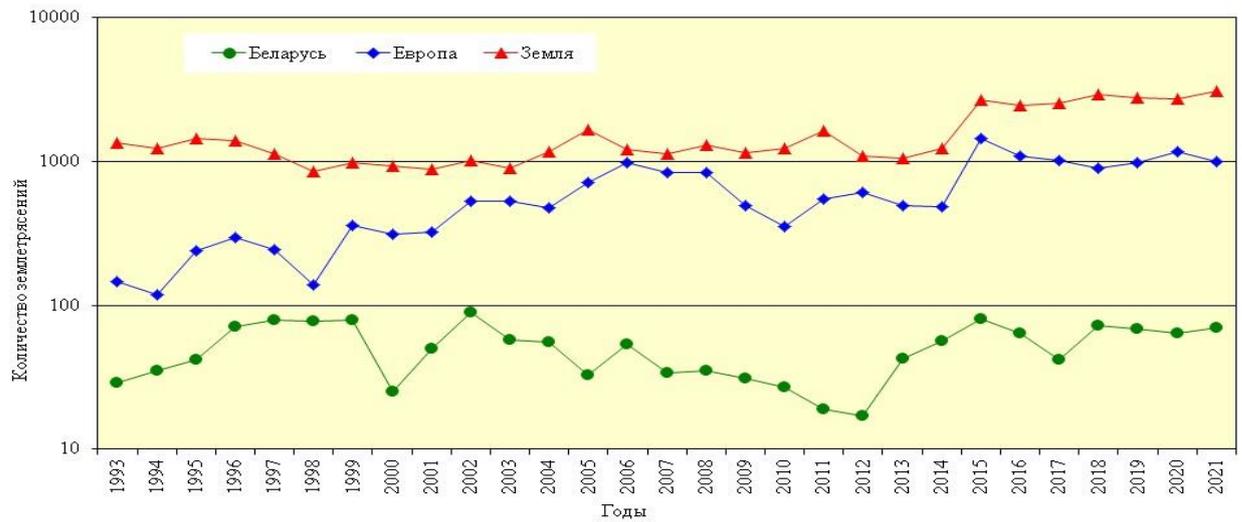


Рисунок 9.18 – График временного хода числа землетрясений на территории Земли, Европы и Беларуси за период 1993 – 2021 гг.

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 потенциала. 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 в последующем. Величину изменения этих параметров сложно спрогнозировать из-за сложности процессов, влияющих на магнитное поле Земли: ускорение движения северного магнитного полюса, изменение солнечной активности.