

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 [59, 60].

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.

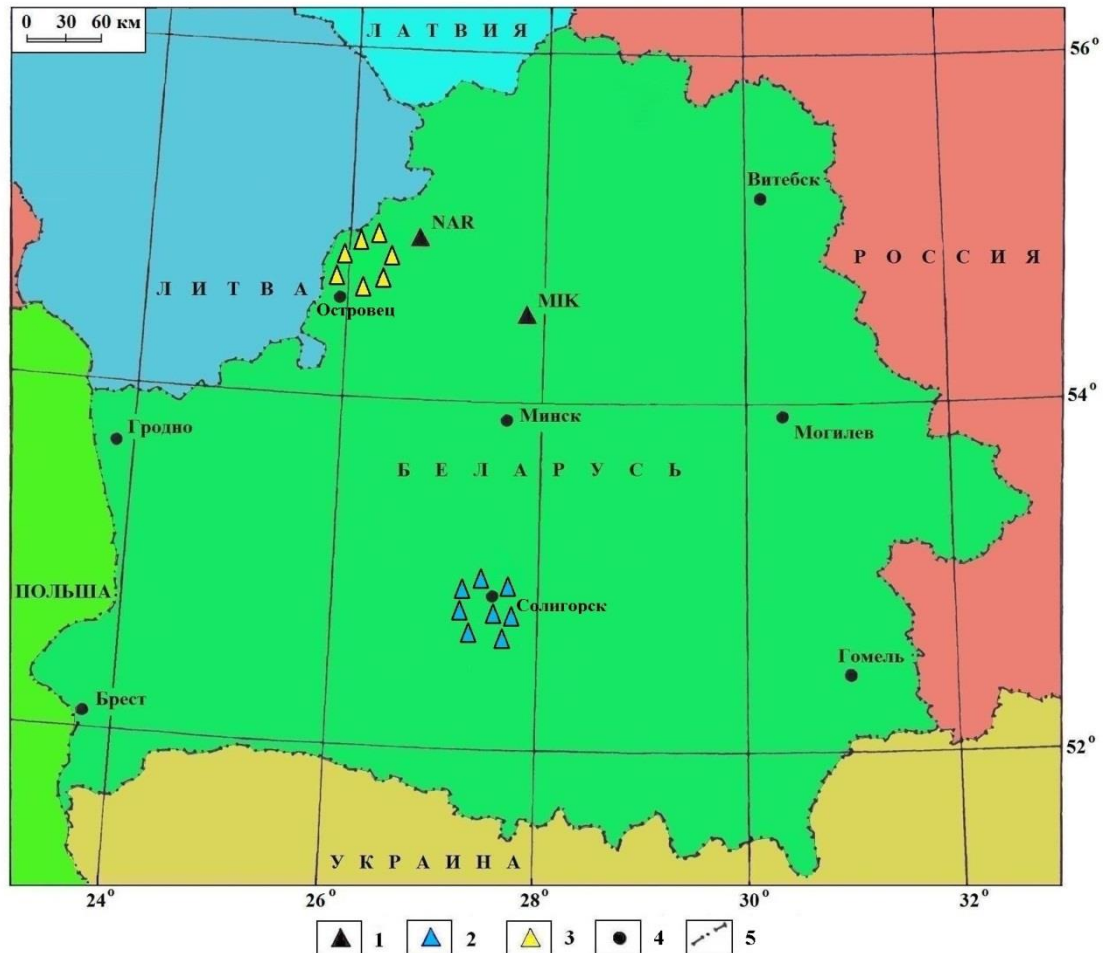
Сеть геофизического мониторинга Беларуси структурно состоит из трех уровней: глобальный, региональный и локальный. Глобальный и региональные уровни мониторинга обеспечивают геофизические обсерватории «Плещеницы» и «Нарочь»; региональный и локальный – сети сейсмических станций в Солигорском и Островецком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

В 2020 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»); Островецком районе (семь сейсмических станций: «Бояры», «Градовщица», «Вадатишки», «Селище», «Горная Каймина», «Воробьи», «Литвяны») (рисунок 9.1).

Основной посыл и выводы

Количество зарегистрированных землетрясений в 2020 г. на глобальном уровне составляет 2742 события, на региональном – 1166 и локальном – 170. Анализ сейсмичности показал, что уровень сейсмической активности в 2020 г. повысился по отношению к 2019 г. на региональном и локальном уровнях и остается повышенным к средним многолетним значениям.

В 2020 г. геомагнитной обсерваторией зафиксировано 9 магнитных бурь, среднегодовое значение суммарных K -индексов составляет 13,12. Определены среднегодовые значения векового хода элементов D (40,76), H (17773,42), Z (48188,83), T (51361,92) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли в 2020 г. был ниже предыдущего года, но остается повышенным к средним многолетним значениям предыдущих годов.



Условные обозначения: 1 – пункты наблюдений: геофизические обсерватории «Плещицы» – МПК 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 2020 г. зарегистрировано 170 землетрясений энергетического диапазона $K=4,4-8,7$ или в единицах локальной магнитуды $M=0,2-2,6$. Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с $M=2,6$ ($K=8,7$) произошло 22 марта (00^h56^m), а наименьшее с $M=0,2$ ($K=4,4$) произошло 27 июля (13^h11^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).

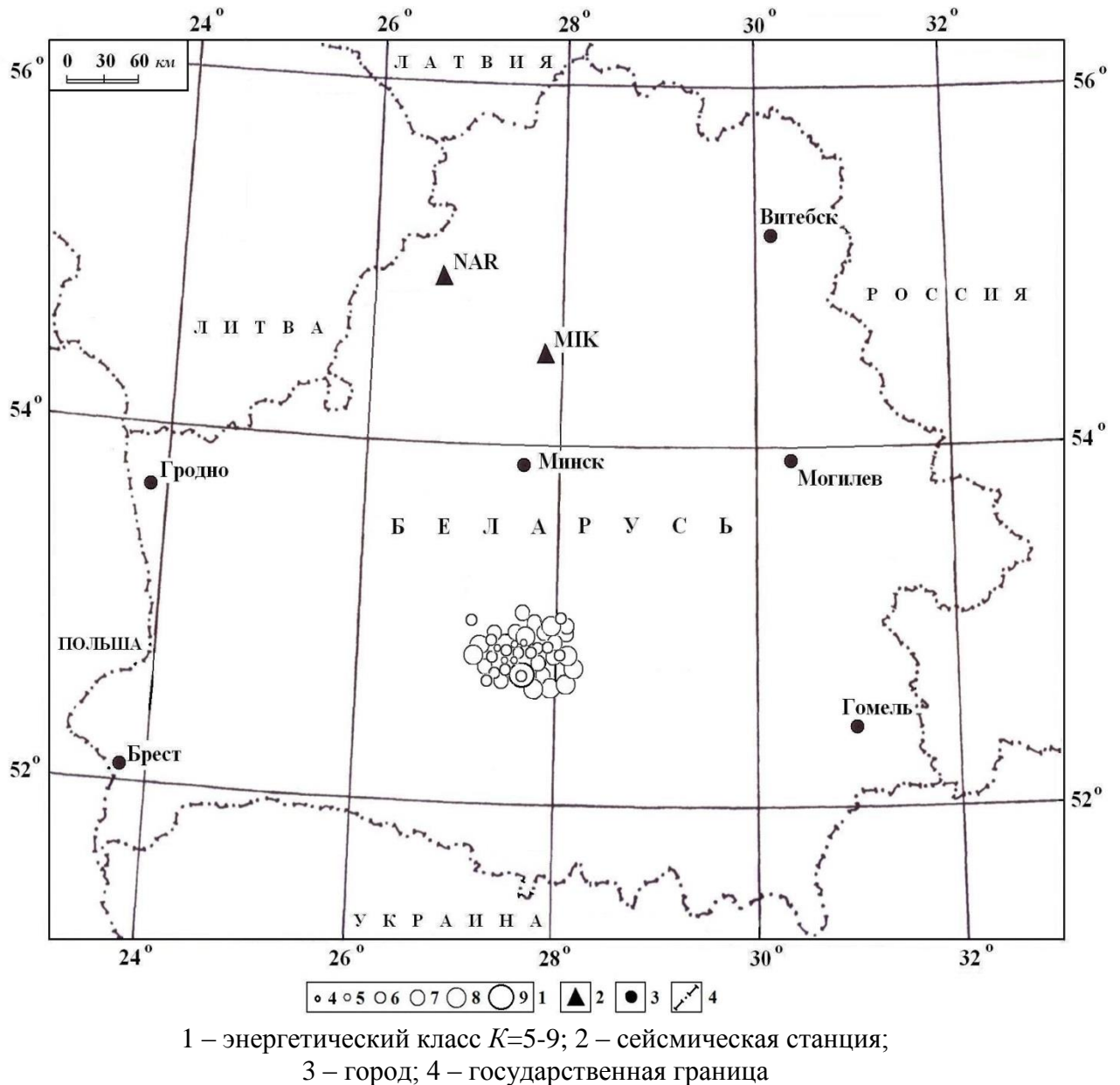


Рисунок 9.2 – Карта эпицентров землетрясений территории Беларуси, 2020 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило неравномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ($1,4505 \cdot 10^9$ Дж) наблюдалось в марте, а минимальное значение ($0,00305 \cdot 10^9$ Дж) отмечено в августе. Максимальное число произошедших сейсмических событий (20) зафиксировано в марте, а минимальное число событий (10) отмечено в апреле.

В 2020 г. наблюдалось снижение (в 4,797) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии $\Sigma E = 3,7237 \cdot 10^9$ Дж по сравнению с 2019 г. ($\Sigma E = 0,7762 \cdot 10^9$ Дж), и увеличение (в 2,079) среднего многолетнего значения $\Sigma E = 1,7909 \cdot 10^9$ Дж за 27 лет (1993-2019 гг.). Количество произошедших сейсмических событий (170) больше (на 42), чем 2019 г. (128), и больше (в 3,209) среднего многолетнего значения ($N_{\Sigma} = 52,963$) за 27 лет.

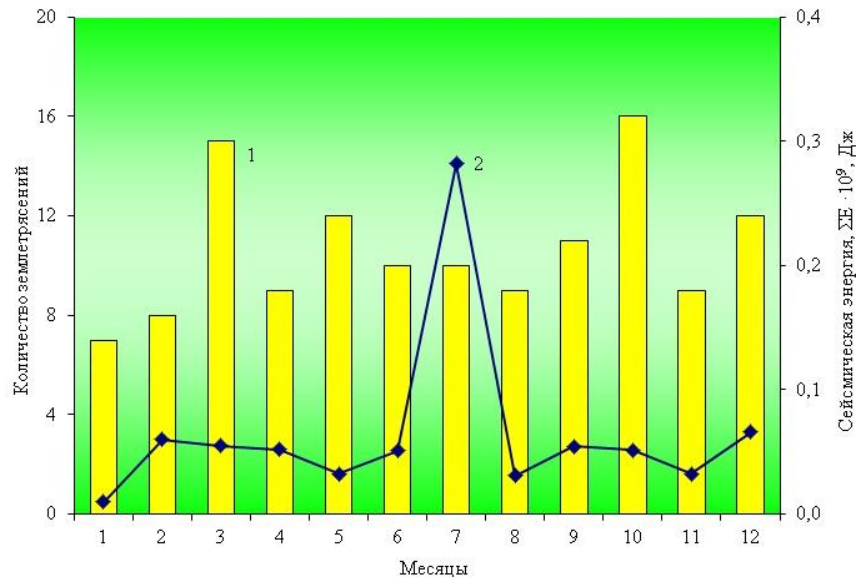


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2020 г.

На рисунке 9.4 представлено многолетнее распределение числа землетрясений и суммарной выделившейся сейсмической энергии по годам за период наблюдений 1993-2020 гг. Анализ долговременного проявления сейсмического процесса на территории Беларуси показал, что максимальные значения суммарной выделившейся сейсмической энергии наблюдались в 1996 и 1999 гг., минимальные отмечены в 2010-2012 гг. Максимальные числа произошедших сейсмических событий отмечено в 1997-1999, 2002, 2015 и 2019 гг. В 2020 г. произошло увеличение выделившейся суммарной сейсмической энергии и возросло количество произошедших сейсмических событий.

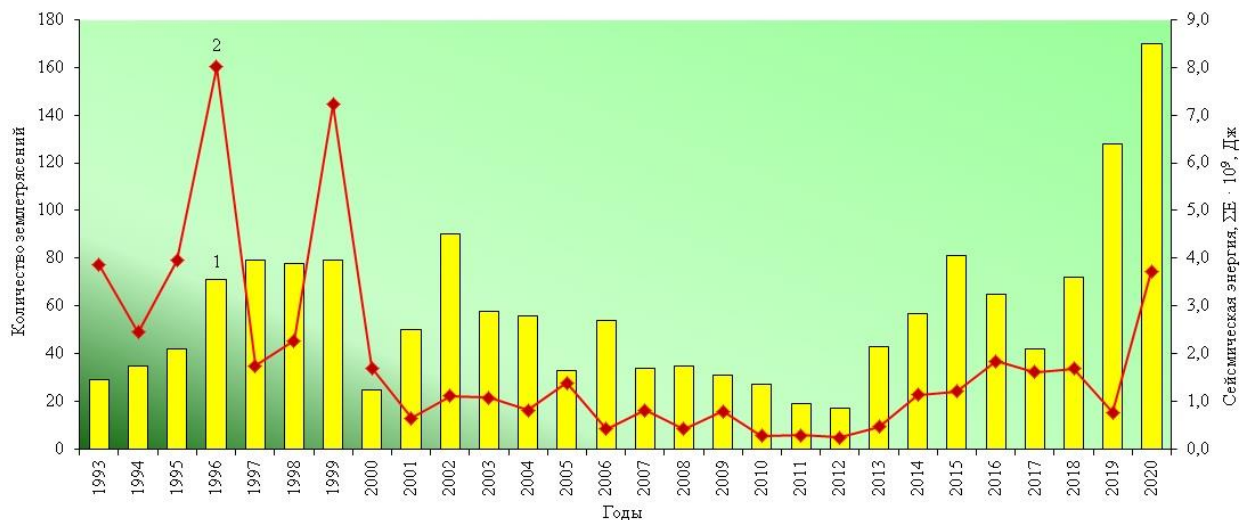


Рисунок 9.4 – Динамика сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993-2020 гг.

На рисунке 9.5 показана частота реализации всех сейсмических событий за 2020 г. в течение суток с периодами повышения числа событий в ночное время – 01^h (13), в дневное время – 18^h и 20^h (11). Анализ частоты реализации сейсмических событий в разные годы не выявил четкого проявления максимумов числа событий в определенное время суток.

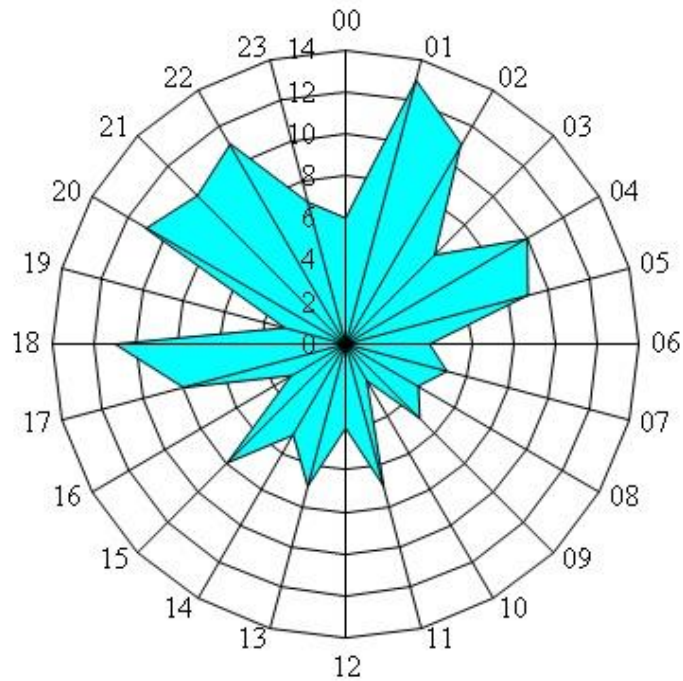


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2020 г. по часам суток

На рисунке 9.6 показано распределение всех землетрясений за 2020 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в воскресенье (31), а минимум в пятницу (14). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявление максимума в определенный день.

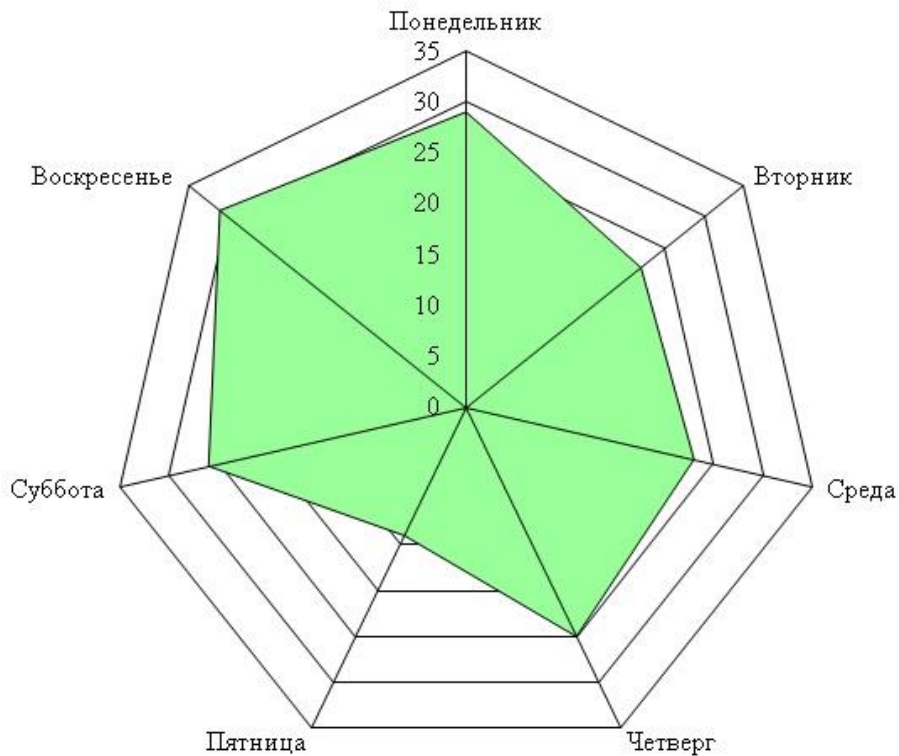


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2020 г.

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 2020 г. выполнено 38 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 2020 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 сентябре (16,6), а минимальное – в январе (10,5). Среднегодовое значение (13,12) суммарных K -индексов за 2020 г. меньше (на 1,41), чем в 2019 г. (14,53) и меньше (в 1,36) среднего многолетнего значения (17,82) за 27 лет (1993-2019 гг.).

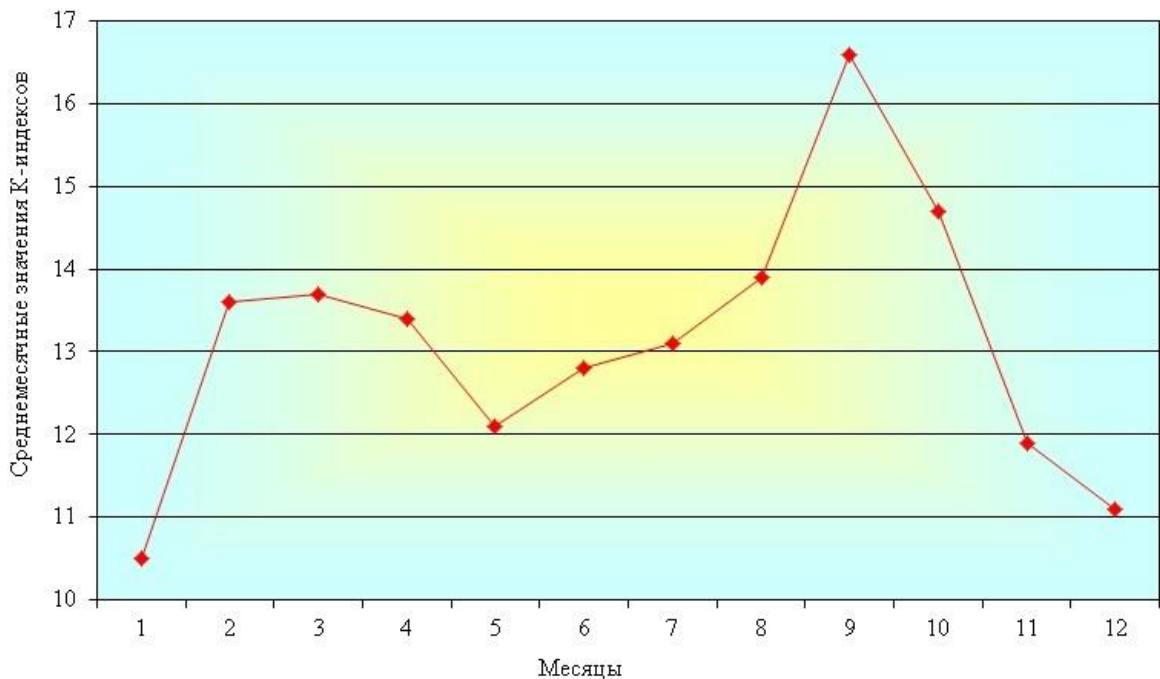


Рисунок 9.7 – Динамика среднемесячных значений суммарных K -индексов в 2020 г.

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. Максимальные значения среднегодовых значений суммарных K -индексов (24) наблюдались в 2000, 2004, 2005 гг., минимальные значения (13) отмечено в 2009 и 2020 гг.

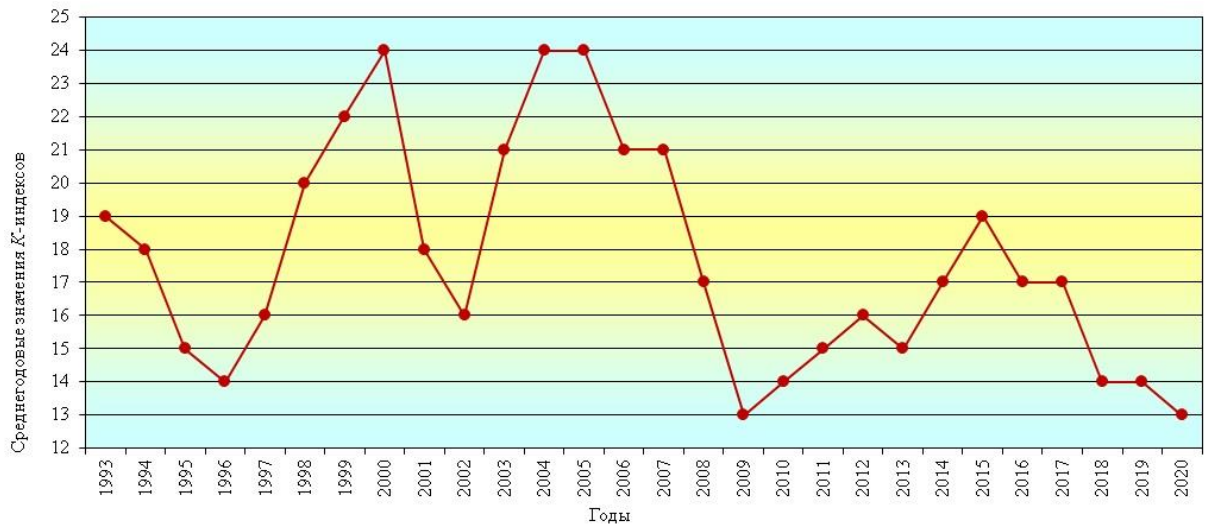


Рисунок 9.8 – Динамика долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K -индексов за 1993-2020 гг.

В 2020 г. зафиксировано и обработано 9 малых магнитных бурь. На рисунке 9.9 показана основная панель управления прибора LEMI-022 с записью малой магнитной бури, произошедшей 1 октября 2020 г., продолжительность бури 96 часов 28 минут.

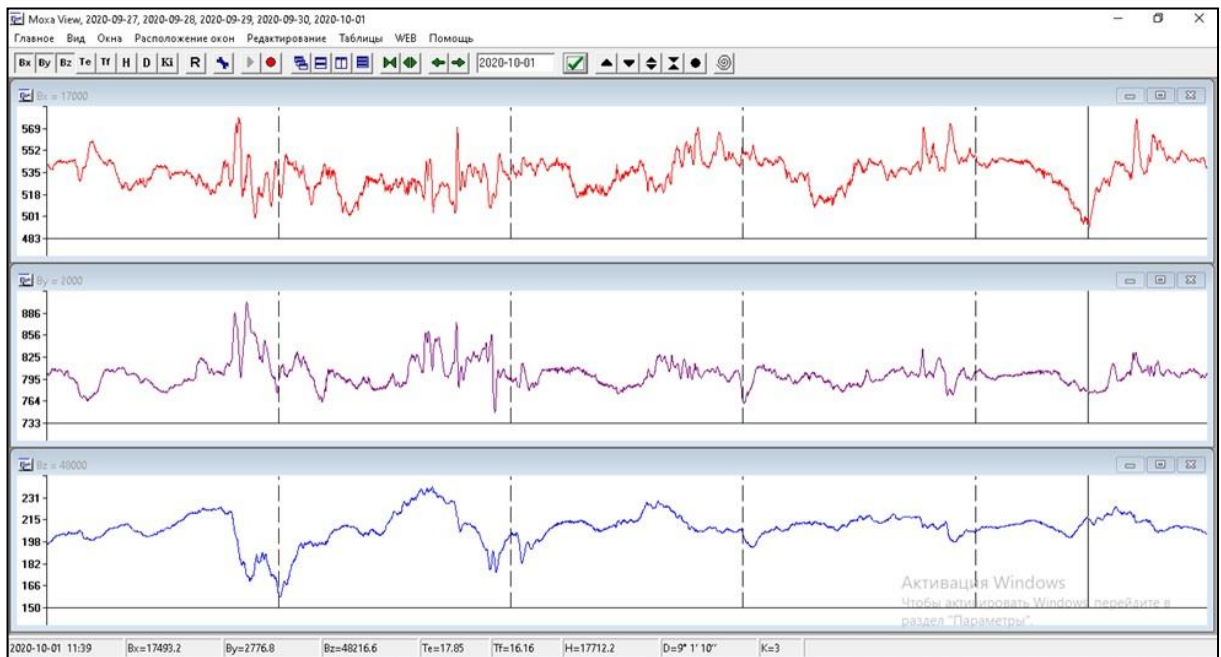


Рисунок 9.9 – Запись малой геомагнитной бури, зарегистрированной геомагнитной обсерваторией «Минск» 01.10.2020 г.

Наибольшее количество магнитных бурь (2) произошло в феврале, августе и сентябре, бури не зафиксированы в январе, марте, мае-июле и декабре (рисунок 9.10). В 2020 г. произошло на 5 геомагнитных бурь меньше, чем в 2019 г. (14), и меньше (в 3,01) среднего многолетнего значения (27,11) за 27 лет (1993-2019 гг.).

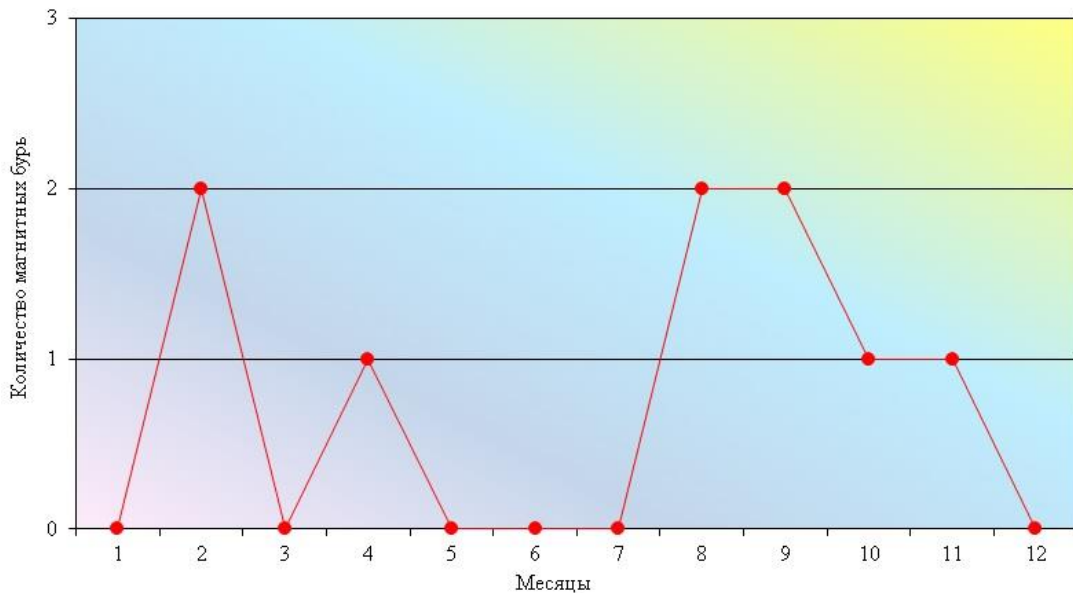


Рисунок 9.10 – График изменения числа магнитных бурь в 2020 г.

Долговременные вариации числа 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 дальнейшем снижением до 2010 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 завершение очередного периода солнечной активности.

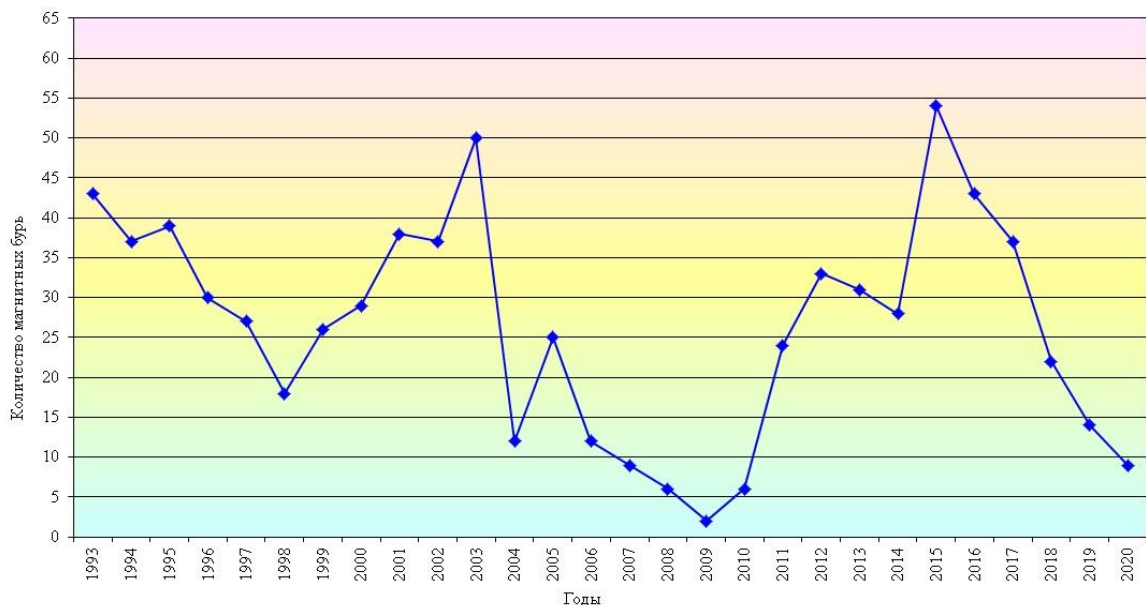


Рисунок 9.11 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993-2020 гг.

Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2020 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 мае (рисунок 9.12). Максимальное значение (543,432 нТл) элемента D отмечено в декабре, а минимальное – в январе (537,294 нТл). Среднегодовое значение (540,755 нТл) элемента D больше (на 106,558 нТл) среднего многолетнего значения (434,197 нТл) за 27 лет (1993-2019 гг.).

Распределение значений элемента H (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило не равномерно (рисунок 9.12). Снижение отмечено в феврале, марте, июне, августе, сентябре и декабре, а рост значений наблюдался в мае и октябре-ноябре. Максимальное значение (17777 нТл) зафиксировано в мае, а минимальное – в сентябре (17768 нТл). Среднегодовое значение (17773,417 нТл) элемента H меньше (на 8,338 нТл) среднего многолетнего значения (17781,750 нТл) за 27 лет (1993-2019 гг.).

На протяжении 2020 г. отмечался рост значений элемента Z (вертикальная составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в августе (рисунок 9.12). Максимальное значение (48221 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (48158 нТл). Среднегодовое значение (48188,833 нТл) элемента Z больше (на 632,392 нТл) среднего многолетнего значения (47556,441 нТл) за 27 лет (1993-2019 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 (51392 нТл) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (51333 нТл). Среднегодовое значение (51361,917 нТл) элемента T больше (на 589,732 нТл) среднего многолетнего значения (50772,185 нТл) за 27 лет (1993-2019 гг.).

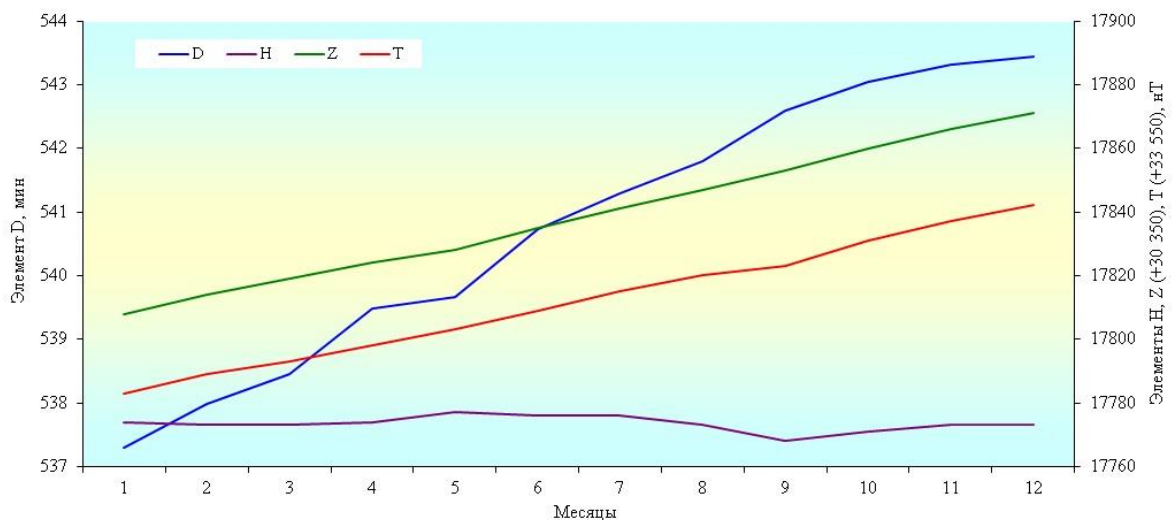


Рисунок 9.12 – Динамика среднемесячных значений элементов D , H , Z , T в 2020 г.

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 1993-2020 гг. Вековой ход склонения D геомагнитного поля за период наблюдений составил в среднем ($0^{\circ}8'20''$) в год, а с 2009 г. вековой ход составляет в среднем ($0^{\circ}8'40''$) в год. Вековой ход вертикальной составляющей Z составляет (68 нТл) в год, а полного вектора T геомагнитного поля (62 нТл) в год. Вековой ход горизонтальной составляющей H геомагнитного поля за 1960-1970 гг. составил в среднем (12 нТл) в год, за 1981-1992 гг. составляет в среднем (-12 нТл), а с 2004 г. вековой ход колеблется возле значения (17789 нТл). Рост значений векового хода наблюдаемых элементов D , Z , T геомагнитного поля указывает на продолжающееся смещение магнитного полюса Земли.

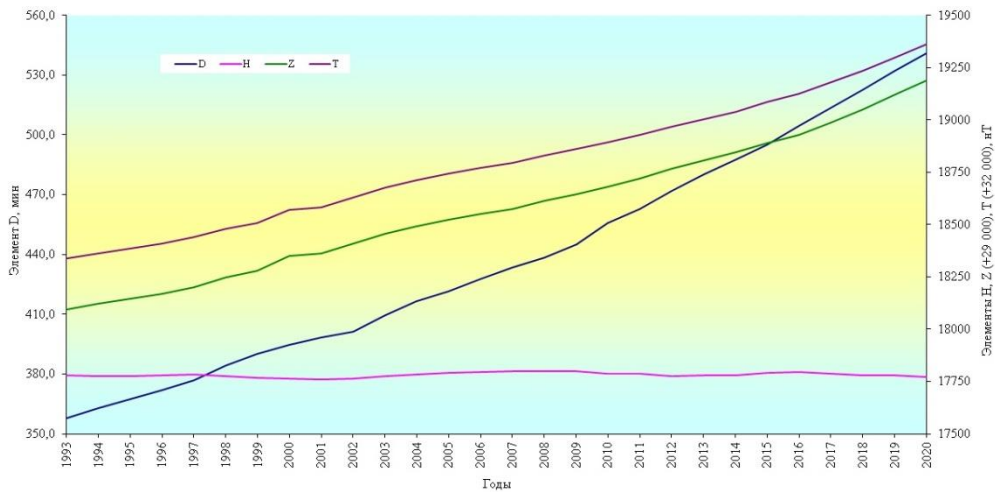


Рисунок 9.13 – Годовой ход составляющих D , H , Z , T геомагнитного поля Земли за период 1993-2020 гг.

Международное сравнение

Глобальный сейсмологический мониторинг. В 2020 г. сетью сейсмических станций зарегистрировано и обработано 2742 землетрясения в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 130 землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, в том числе 8 событий с $M \geq 7,0$. Самое сильное землетрясение с магнитудой $M=7,7$ произошло 19 октября ($20^{\text{h}}54^{\text{m}}$) южнее полуострова Аляска. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2020 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 Трансзиатский, Атлантический и Индийский сейсмические пояса и другие сейсмоактивные регионы Земли.

В 2020 г. наибольшее число землетрясений (287) зафиксировано в июне, а наименьшее (167) в феврале (рисунок 9.14). Количество произошедших землетрясений (2742) меньше на 35, чем в 2019 г. (2777), но больше (в 1,879) среднего многолетнего значения (1459,29) за 27 лет (1993-2019 гг.).

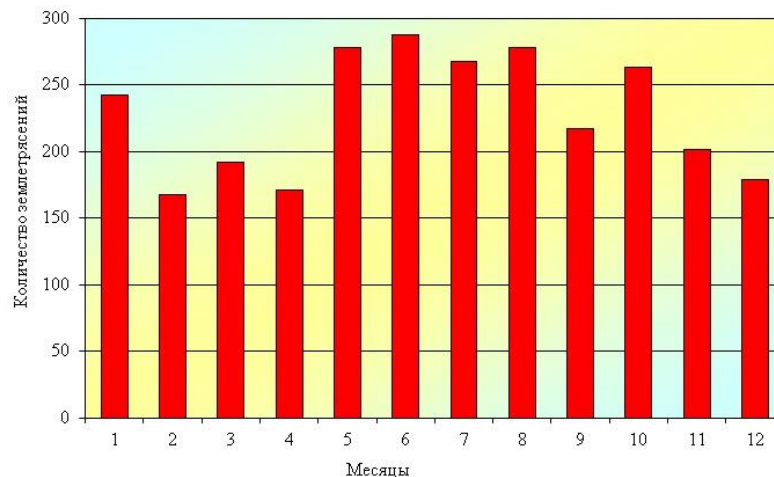


Рисунок 9.14 – График изменения количества землетрясений Земли в 2020 г.

Региональный сейсмологический мониторинг. На территории Европы и смежных областях в 2020 г. зарегистрировано 1166 землетрясений с магнитудой $M \geq 3,0$, из них 80 событий с $M \geq 5,0$. Самое сильное землетрясение с $M=7,0$ произошло 30 октября ($11^{\text{h}}51^{\text{m}}$) на островах Додеканес, 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 число землетрясений (151) произошло в мае, а наименьшее (76) в марте и июле (рисунок 9.15). В 2020 г. отмечено на 191 землетрясение больше, чем в 2019 г. (975) и больше (в 2,03) среднего многолетнего значения (573,26) за 27 лет (1993-2019 гг.).

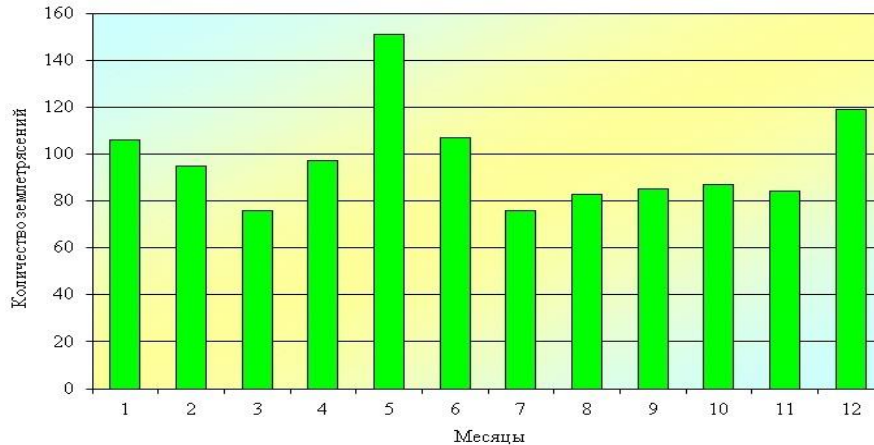


Рисунок 9.15 – Количество землетрясений Европы и смежных областей в 2020 г.

На рисунке 9.16 представлен долговременный график хода числа землетрясений на территории Европы и смежных областях с магнитудами $M \geq 3,0$ за период 1993-2019 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.

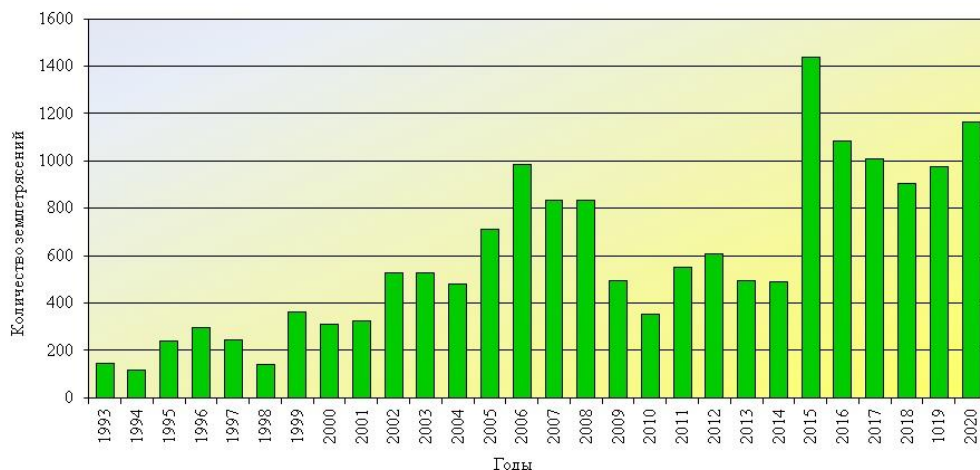


Рисунок 9.16 – Динамика землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой $M \geq 3,0$ за 1993-2020 гг.

Комплексный анализ параметров сейсмичности. На основе анализа и обобщения сейсмологического мониторинга территории Земли, Европы и Беларуси выполнен комплексный анализ параметров сейсмичности за период 1993-2020 гг. (рисунок 9.17).

Анализ сейсмичности показал, что на территории Земли максимальное число землетрясений (2920) зафиксировано в 2018 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 (170) зафиксировано в 2020 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.

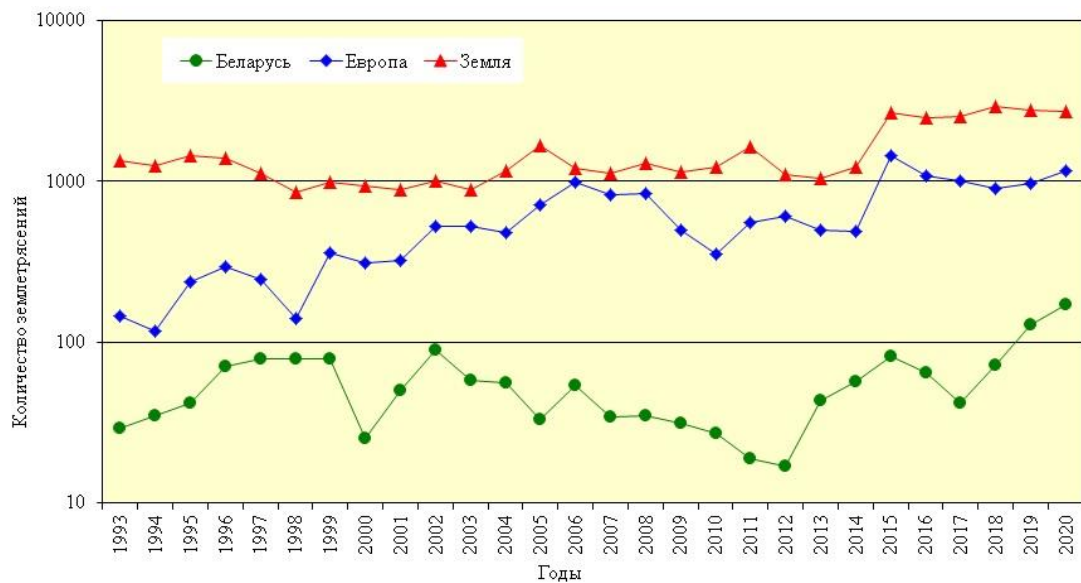


Рисунок 9.17 – Временной ход числа землетрясений на территории Земли, Европы и Беларуси за период 1993-2020 гг.

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.