

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 [57, 58].

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;

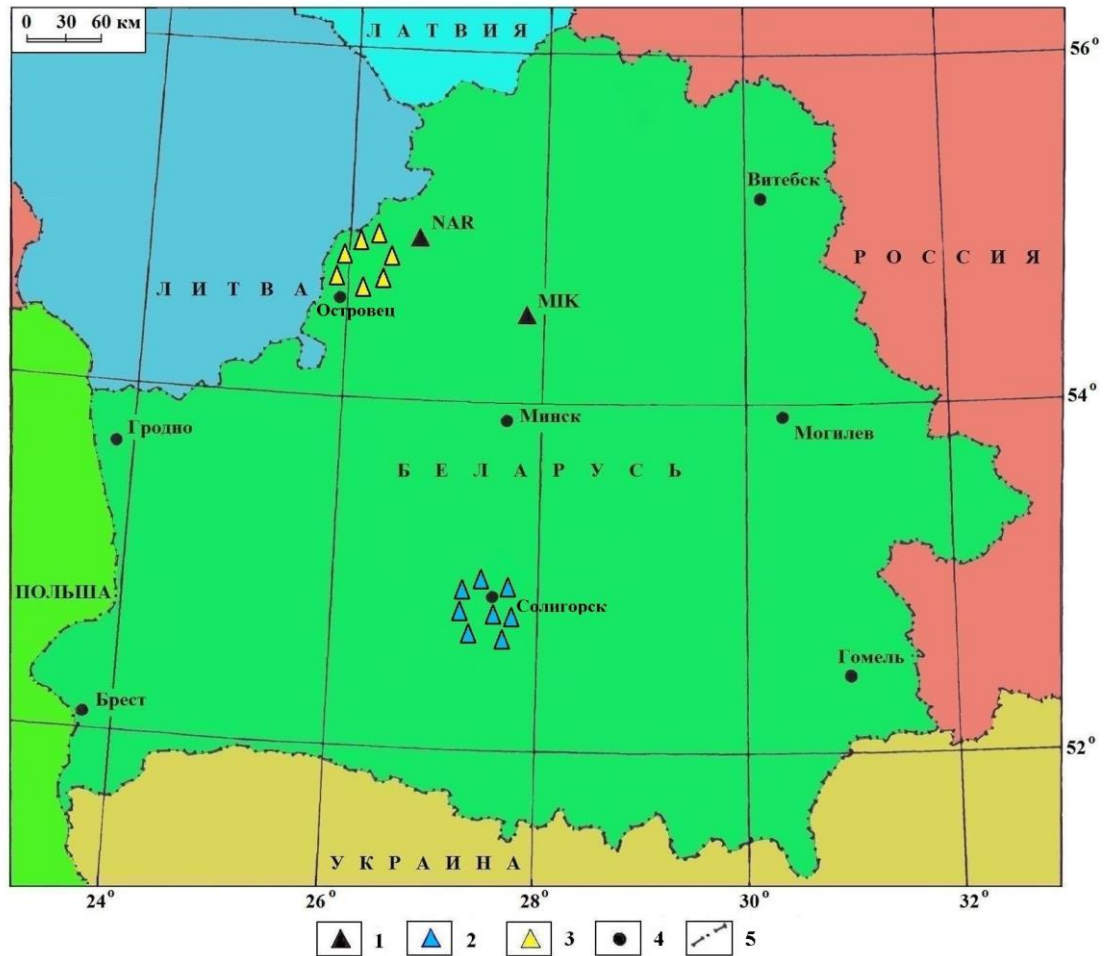
геомагнитный мониторинг, включающий непрерывные стационарные наблюдения за текущим состоянием геомагнитного поля и периодические наблюдения за геодинамическими процессами на полигонах.

Сейсмологические наблюдения позволяют изучать причины происхождения очагов землетрясений и определять их кинематические и динамические параметры, а также оценивать степень сейсмических воздействий, их опасность и риск для хозяйственных объектов; разрабатывать методы предсказания землетрясений.

Геомагнитные наблюдения направлены на изучение векового хода составляющих магнитного поля Земли. Наблюдения проводятся в геофизической обсерватории «Плещеницы» феррозондовым магнитометром LEMI-022, регистрирующим изменения во времени на горизонтальных – X и Y и вертикальной – Z составляющих. По данным проводимых наблюдений ежемесячно составлялся обзор состояния геомагнитного поля.

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 2019 г. сейсмологические наблюдения проведены Центром геофизического мониторинга НАН Беларуси в непрерывном режиме с использованием автоматизированных систем. Наблюдения проводились в следующих пунктах наблюдений: геофизических обсерваториях «Плещеницы» и «Нарочь», 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», «Градовщина», «Вадатишки», «Селище», «Горная Каймина», «Воробьи», «Литвяны») (рисунок 9.1).



Условные обозначения: 1 – пункты наблюдений: геофизические обсерватории: «Плещеницы» – МПК, «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

Основной посыл и выводы

Количество зарегистрированных землетрясений в 2019 г. на глобальном уровне составляет 2777 событий, на региональном – 975 и локальном – 128. Анализ сейсмичности показал, что уровень сейсмической активности в 2019 г. повысился по отношению к предыдущему году, и остается повышенным к средним многолетним значениям.

В отчетном году геомагнитной обсерваторией зафиксировано 14 магнитных бурь, среднегодовое значение суммарных K -индексов составляет 14,53. Определены среднегодовые значения векового хода элементов D (532,42), H (17778,25), Z (48120,92), T (51300,0) геомагнитного поля Земли. Уровень активности геомагнитного поля Земли в 2019 г. ниже предыдущего года, но остается повышенным к средним многолетним значениям предыдущих годов

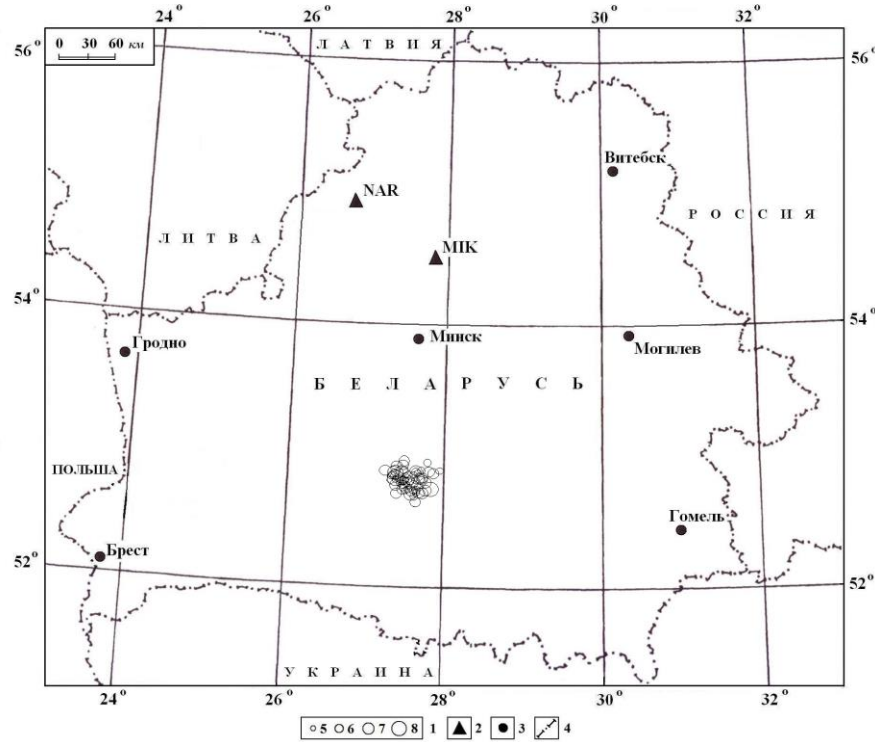
Результаты наблюдений и оценка

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 2019 г. зарегистрировано 128 землетрясений энергетического диапазона $K=4,9-8,2$ или в единицах локальной магнитуды $M=0,5-2,3$. Согласно зафиксированным данным, самое сильное землетрясение с $M=2,3$ ($K=8,2$) произошло 5 июля ($15^{\text{h}}59^{\text{m}}$), а наименьшее с $M=0,5$ ($K=4,9$) произошло 7 сентября ($20^{\text{h}}59^{\text{m}}$). Основная часть сейсмических событий приурочена к зоне сочленения северо-западной части Припятского прогиба и Белорусской антеклизы, включая Солигорский горнопромышленный район и окружающую его территорию (рисунок 9.2).



1 – энергетический класс $K=5-8$; 2 – сейсмическая станция;
3 – город; 4 – государственная граница

Рисунок 9.2 – Карта эпицентров землетрясений территории Беларуси, 2019 г.

В течение года высвобождение сейсмической энергии происходило неравномерно (рисунок 9.3). Максимальное выделение сейсмической энергии ($0,2818 \cdot 10^9$ Дж) наблюдалось в июле, а минимальное значение ($0,0097 \cdot 10^9$ Дж) отмечено в январе. Максимальное число произошедших сейсмических событий (16) зафиксировано в октябре, а минимальное число событий (7) отмечено в январе.

В 2019 г. наблюдалось снижение (в 2,18 раза) уровня выделившейся суммарной сейсмической энергии $\Sigma E=0,7762 \cdot 10^9$ Дж по сравнению с 2018 г. ($\Sigma E=1,6915 \cdot 10^9$ Дж), и снижение (в 2,36 раза) среднего многолетнего значения $\Sigma E=1,83 \cdot 10^9$ Дж за 26 лет (1993-2018 гг.). Количество произошедших сейсмических событий (128) больше (в 1,78 раза), чем 2018 г. (72), и больше (в 2,56 раза) среднего многолетнего значения ($N_{\Sigma}=50,08$) за 26 лет.

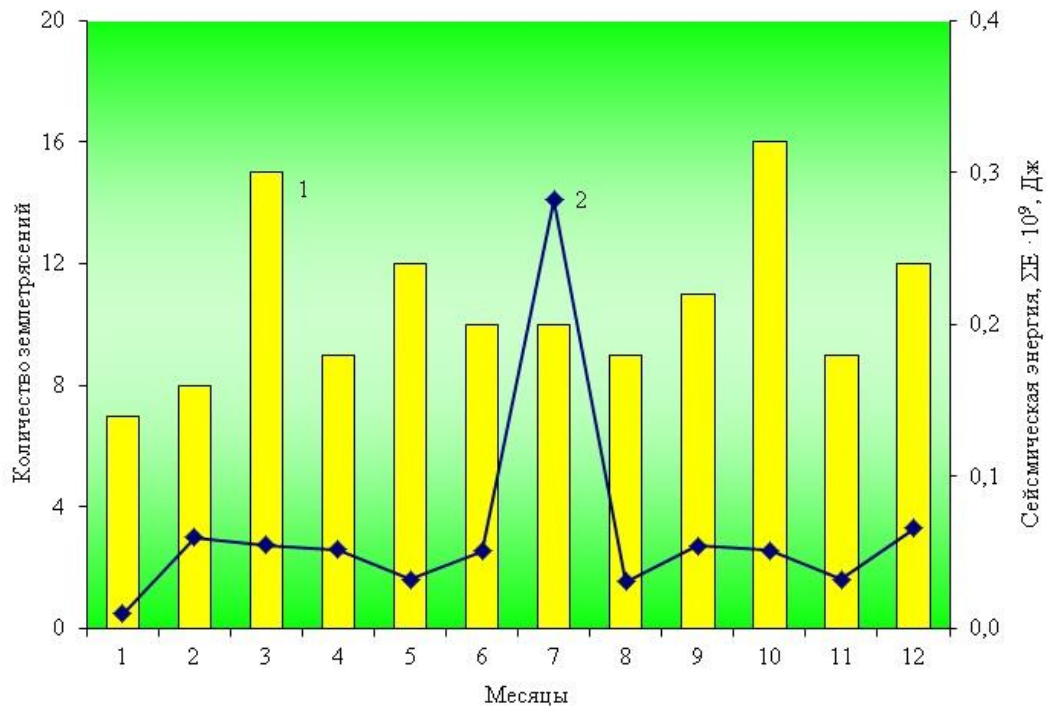


Рисунок 9.3 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 2019 г.

На рисунке 9.4 представлен долговременный график распределения числа землетрясений и суммарной выделившейся сейсмической энергии по годам за период 1993-2019 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. Максимальное число произошедших сейсмических событий отмечено в 1997-1999, 2002, 2015 и 2019 гг. В 2019 г. произошло снижение выделившейся суммарной сейсмической энергии, но возросло количество произошедших сейсмических событий. Связано это с небольшим магнитудным потенциалом произошедших землетрясений.

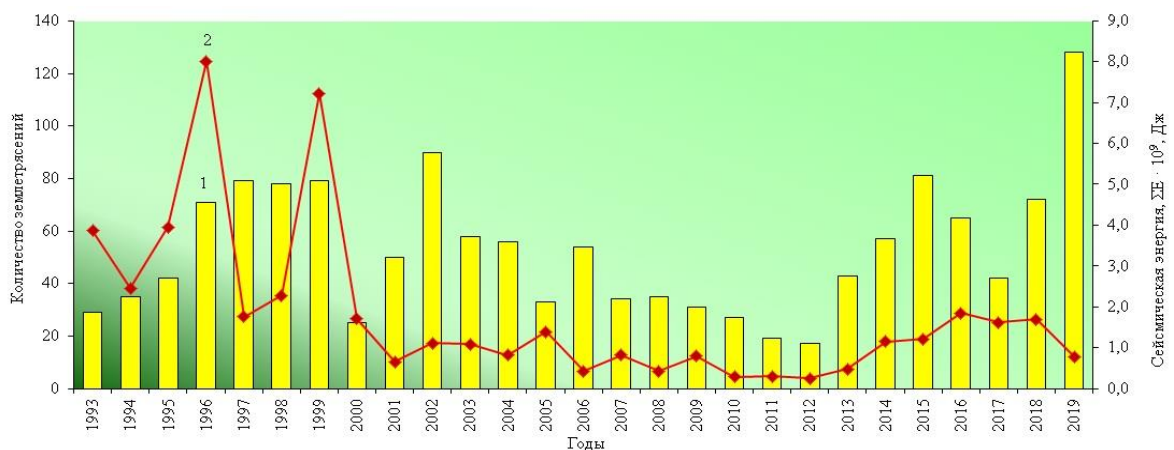


Рисунок 9.4 – График изменения числа сейсмических событий (1) и величины их суммарной сейсмической энергии (2) за 1993-2019 г.

На рисунке 9.5 показана частота реализации всех сейсмических событий за 2019 г. в течение суток с периодами повышения числа событий в ночное время – 00^h и 01^h, в дневное время – 12^h, 18^h и 20^h. Анализ частоты реализации сейсмических событий в разные годы, не выявил четкого проявления максимумов числа событий в определенное время суток.

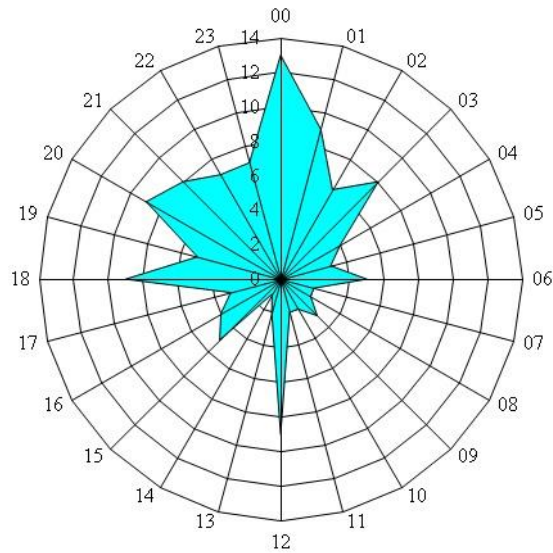


Рисунок 9.5 – Распределение сейсмических событий 2019 г. по часам суток

На рисунке 9.6 показано распределение всех землетрясений за 2019 г. по дням недели, среди которых максимум преобладает в четверг (26), а минимум во вторник (13). Многолетнее распределение землетрясений по дням недели не выявило проявление максимума в определенный день.

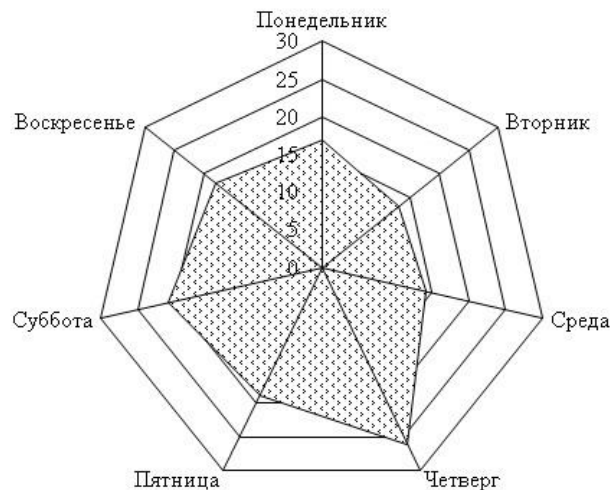


Рисунок 9.6 – Распределение сейсмических событий по дням недели в 2019 г.

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. Выполнено 40 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 2019 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 (17,6), а минимальное – в январе (11,7). Среднегодовое

значение (14,53) суммарных K -индексов за 2019 г. немного больше (в 1,004 раза), чем в 2018 г. (14,48) и меньше (в 1,24 раза) среднего многолетнего значения (17,96) за 26 лет (1993-2018 гг.).

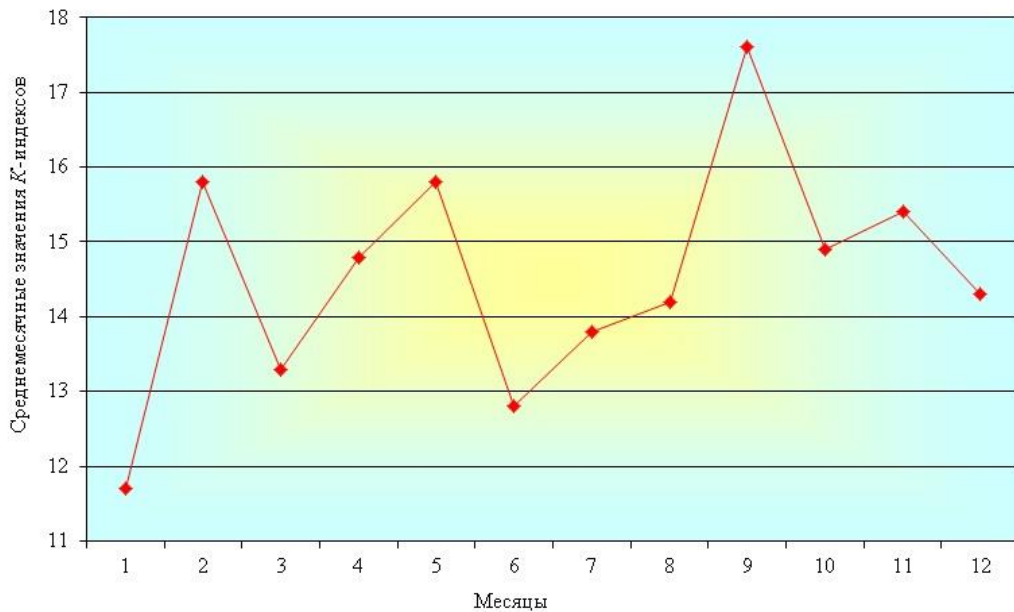


Рисунок 9.7 – График изменения среднемесячных значений суммарных K -индексов в 2019 г.

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 2010-2018 гг., с небольшой стабилизацией в 2017 г. В 2019 г. наблюдается рост значений, возможно, это начало формирования четвертого периода. Максимальные значения среднегодовых значений суммарных K -индексов (24) наблюдались в 2000, 2004, 2005 гг., минимальное значение (13) отмечено в 2009 г.

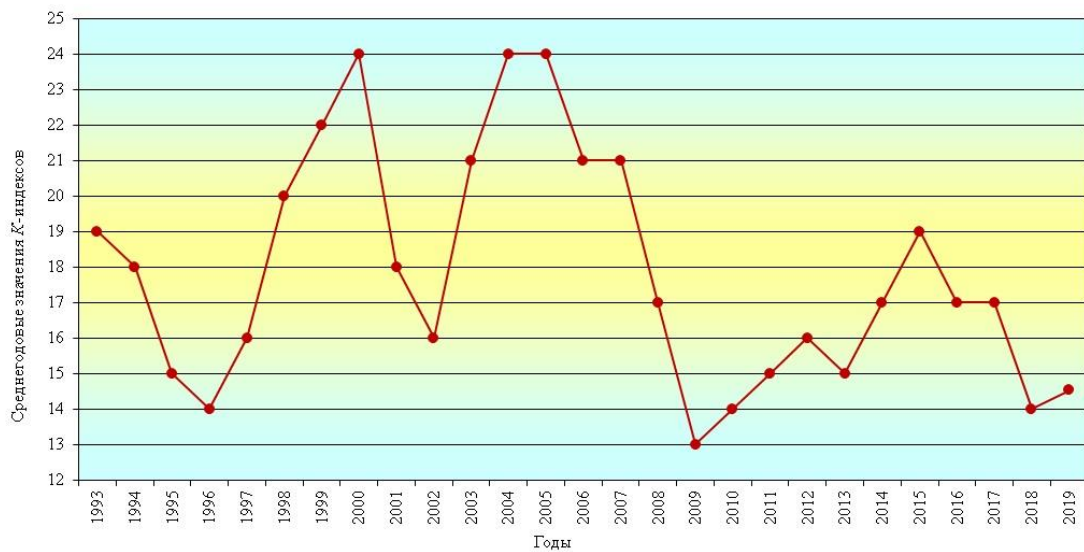


Рисунок 9.8 – График долговременных вариаций среднегодовых значений суммарных K -индексов за 1993-2019 гг.

В 2019 г. зафиксировано и обработано 14 магнитных бурь, из них 13 малых бурь (М) и 1 умеренная буря (У). Наибольшее количество магнитных бурь (2) зафиксировано в январе, мае, августе–октябре, а минимальное – в апреле, ноябре и декабре (0) (рисунок 9.9). В 2019 г. произошло на 8 геомагнитных бурь меньше, чем в 2018 г. (22), и меньше (в 1,97 раза) среднего многолетнего значения (27,62) за 26 лет (1993-2018 гг.).

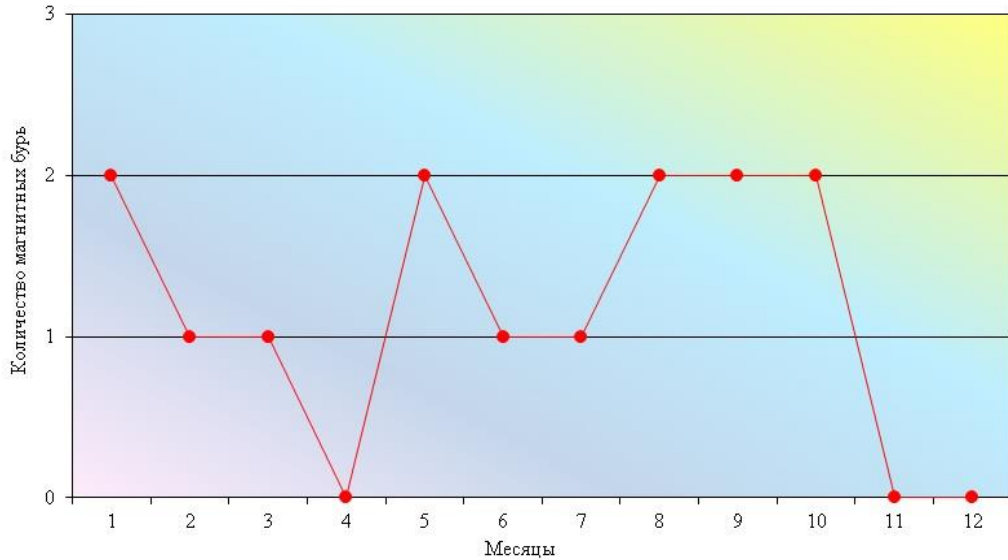


Рисунок 9.9 – График изменения числа магнитных бурь в 2019 г.

Долговременные вариации числа магнитных бурь показывают, что периоды снижения сменяются периодами возрастания значений параметра (рисунок 9.10). Так, в 1993–1998 гг. наблюдалось снижение значений параметра, в 1999–2003 гг. отмечался рост значений с локальным понижением в 2004 г. и дальнейшим снижением до 2010 г. В 2010–2015 гг. наблюдался период возрастания, с небольшим понижением в 2013–2014 гг. Затем в 2016–2019 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.

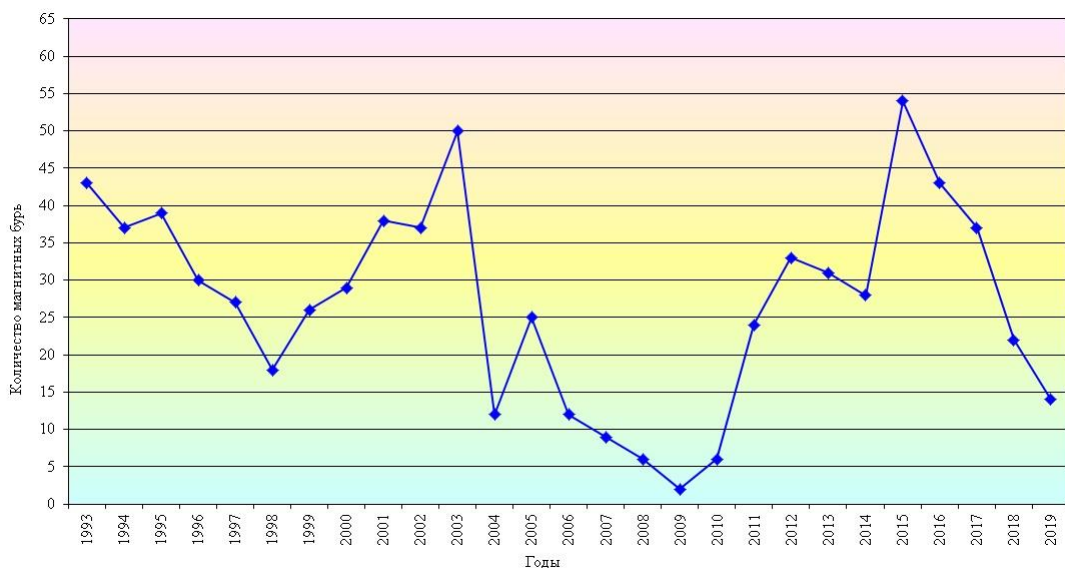


Рисунок 9.10 – График долговременных вариаций количества магнитных бурь за период 1993-2019 гг.

Обзор состояния геомагнитного поля Земли в 2019 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 небольшой стабилизацией в октябре (рисунок 9.11). Максимальное значение (536,09) элемента D отмечено в декабре, а минимальное – в январе (527,11). Среднегодовое значение (532,42) элемента D больше на (102,0) среднего многолетнего значения (430,42) за 26 лет (1993-2018 гг.).

Распределение значений элемента H (горизонтальная составляющая магнитного поля) в течение года проходило не равномерно (рисунок 9.11). Снижение отмечено в феврале–апреле и сентябре–октябре, декабре, а рост значений наблюдался в мае–августе и ноябре. Максимальное значение (17791) зафиксировано в августе, а минимальное – в октябре (17773). Среднегодовое значение (17778,25) элемента H меньше на (3,64) среднего многолетнего значения (17781,89) за 26 лет (1993-2018 гг.).

На протяжении всего года отмечался рост значений элемента Z (вертикальная составляющая магнитного поля) с небольшим замедлением роста в августе (рисунок 9.11). Максимальное значение (48153) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (48088). Среднегодовое значение (48120,92) элемента Z больше на (586,19) среднего многолетнего значения (47534,73) за 26 лет (1993-2018 гг.).

В течение года увеличивалось значение элемента T (полный вектор напряженности магнитного поля Земли) с небольшой стабилизацией роста в октябре (рисунок 9.11). Максимальное значение (51329) отмечено в декабре, а минимальное – в январе (51270). Среднегодовое значение (51300,0) элемента T больше на (548,14) среднего многолетнего значения (50751,86) за 26 лет (1993-2018 гг.).

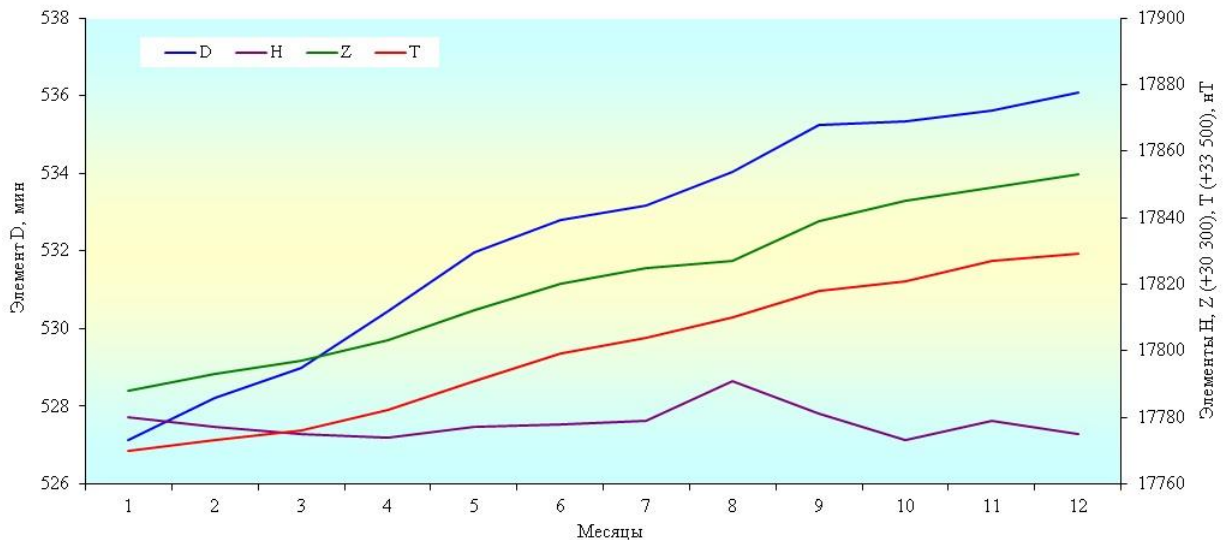


Рисунок 9.11 – График изменения среднемесячных значений элементов D , H , Z , T в 2019 г.

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 9.12 показан годовой ход элементов D , H , Z , T геомагнитного поля Земли на геомагнитной обсерватории «Минск» (н.п. Плещеницы) за период 1993-2019 гг. Вековой ход склонения D геомагнитного поля за период наблюдений (с 1993 г. по 2019 г.) составляет рост значений на $2^{\circ}54,1'$ или в среднем $6,46'$ в год. Вековой ход вертикальной составляющей Z геомагнитного поля за период наблюдений составляет рост значений на 1046 нТ или в среднем 38,0 в год. Вековой ход полного вектора T геомагнитного поля за период наблюдений составляет рост значений на 962 нТ или в среднем 35,63 нТ в год. Вековой ход горизонтальной составляющей H

геомагнитного поля за период наблюдений колеблется возле значения 17781,74 нТ и показывает снижение значений на 2 нТ или в среднем на 0,07 нТ в год. Рост значений векового хода наблюдаемых элементов D , Z , T геомагнитного поля указывает на продолжающееся смещение магнитного полюса Земли.

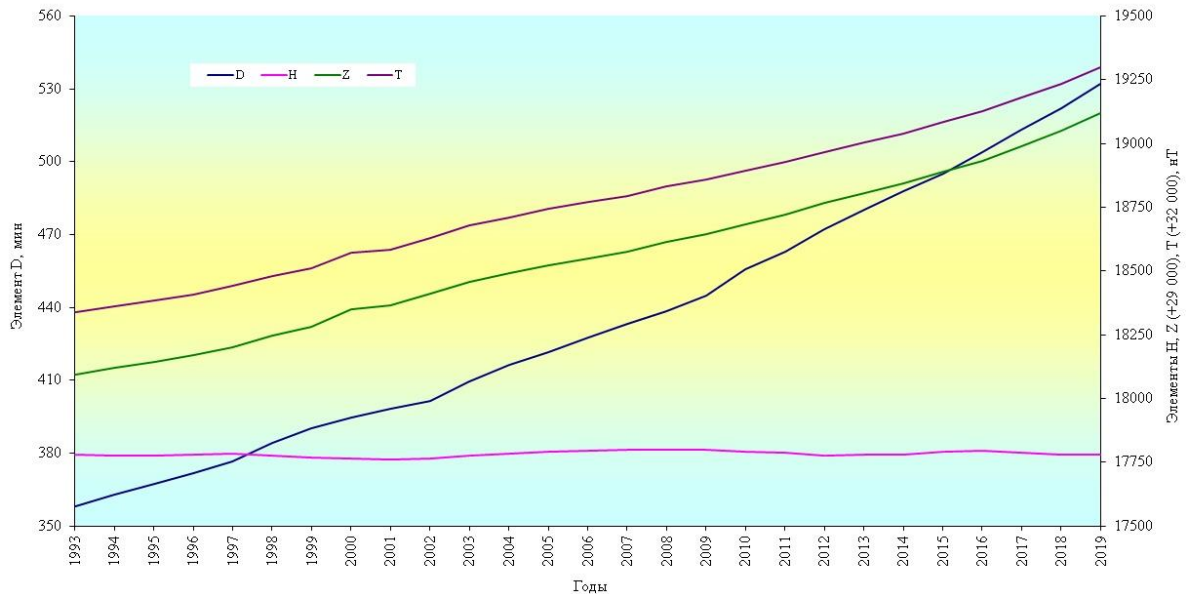


Рисунок 9.12 – Годовой ход составляющих D , H , Z , T геомагнитного поля Земли за период с 1993 по 2019 гг.

Международное сравнение

Глобальный сейсмологический мониторинг. В 2019 г. сетью сейсмических станций зарегистрировано и обработано 2777 землетрясений в разных регионах Земли в широком диапазоне энергий и эпицентральных расстояний, из них 176 землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$, в том числе 11 событий с $M \geq 7,0$. Самое сильное землетрясение с $M=8,0$ произошло 26 мая (07^h41^m UTC) на севере Перу. Анализ сейсмичности Земли показал, что в 2019 г. географическое распределение эпицентров землетрясений Земли в основном соответствует известной мировой статистике наблюдаемых на земном шаре землетрясений. В этих регионах непрерывно накапливаются тектонические напряжения, периодически разряжающиеся 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 2019 г. наибольшее число землетрясений (287) зафиксировано в марте, а наименьшее (196) в августе (рисунок 9.13). Количество произошедших землетрясений (2777) меньше на 143, чем в 2018 г. (2920), но больше (в 1,97 раза) среднего многолетнего значения (1408,62) за 26 лет (1993-2018 гг.).

На рисунке 9.14 представлен долговременный график количества землетрясений по годам за период с 1993 по 2019 гг. Наблюдались 3 активных периода: 1993-1996 гг. с максимумом землетрясений в 1995 г. (1450), 2005-2011 гг. с максимумом землетрясений в 2005 г. (1674), 2015-2019 гг. с максимумом землетрясений в 2018 г. (2920). Минимальное число землетрясений наблюдалось в 1998 г. (854), 2001 г. (886) и 2003 г. (895).

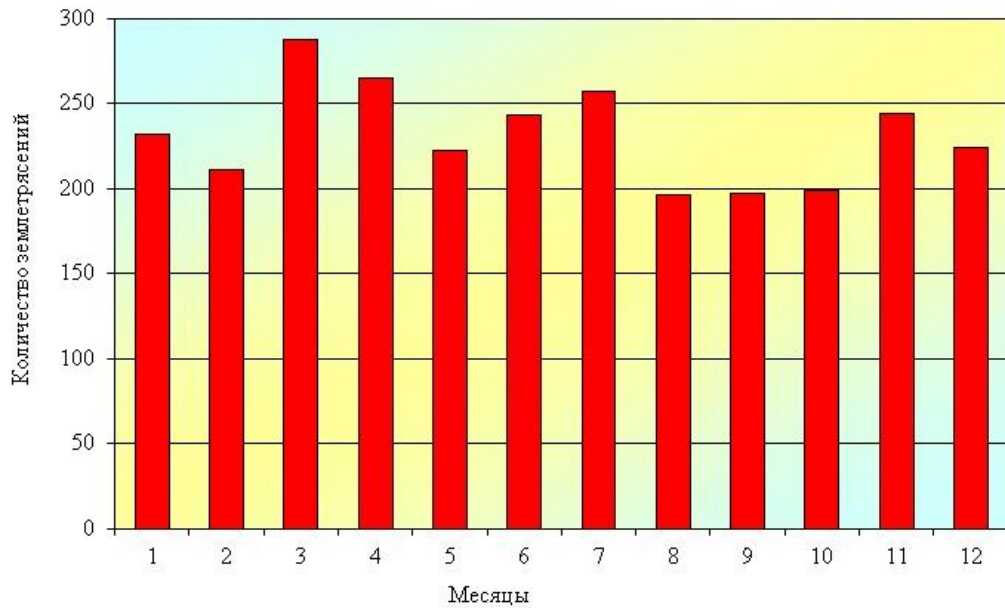


Рисунок 9.13 – График изменения количества землетрясений Земли в 2019 г.

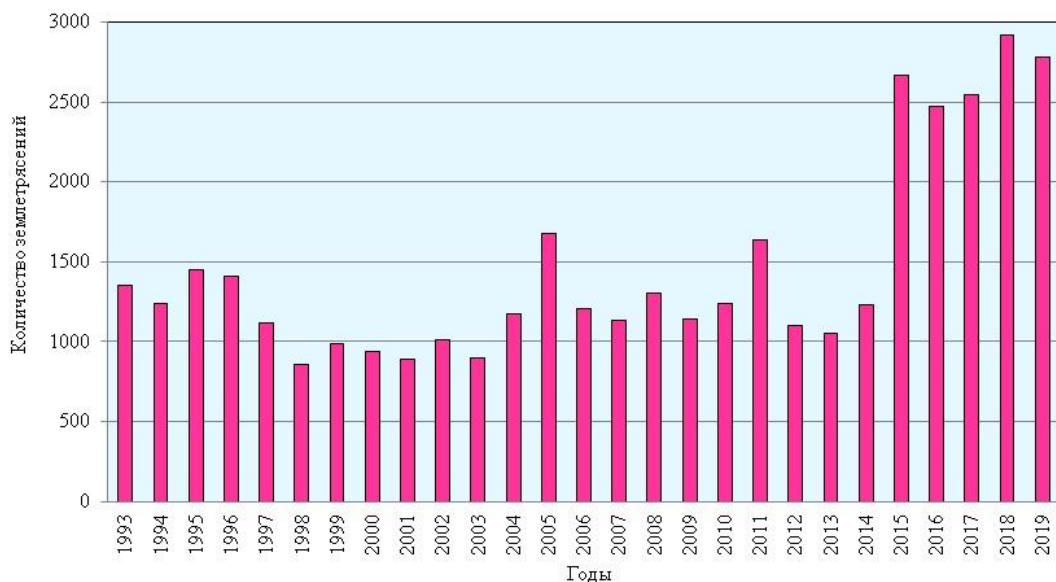


Рисунок 9.14 – График изменения во времени количества землетрясений Земли за 1993-2019 гг.

Региональный сейсмологический мониторинг. На территории Европы и смежных областях в 2019 г. зарегистрировано 975 землетрясений с магнитудой $M \geq 3,0$, из них 49 событий с $M \geq 5,0$. Самое сильное землетрясение с $M=6,4$ произошло 26 ноября (02^h54^m) в Албании. 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 (102) произошло в марте, а наименьшее (52) в октябре (рисунок 9.15). В 2019 г. отмечено на 72 землетрясения больше, чем в 2018 г. (903) и выше (в 1,75 раза) среднего многолетнего значения (557,81) за 26 лет (1993-2019 гг.).

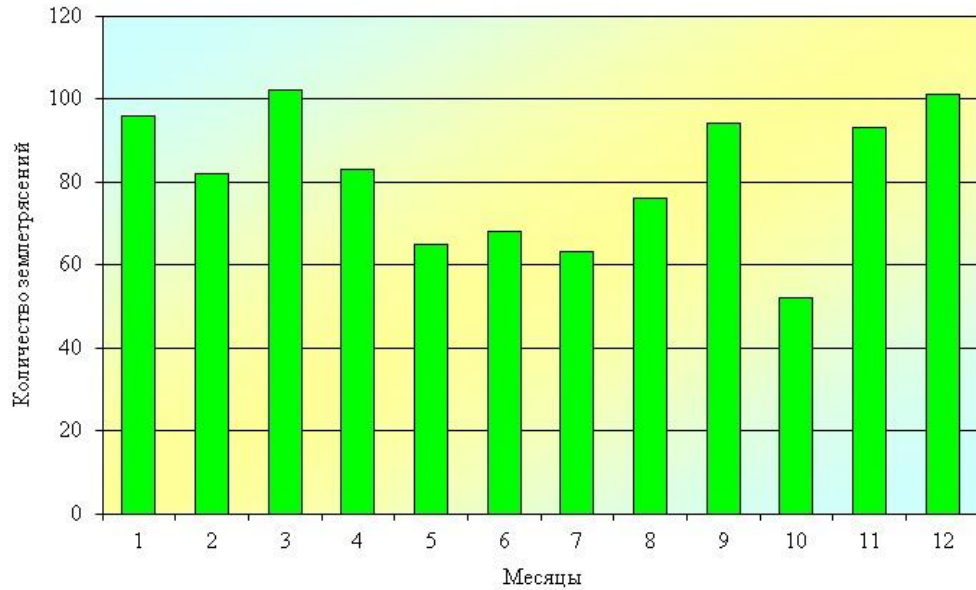


Рисунок 9.15 – График изменения количества землетрясений Европы и смежных областей в 2019 г.

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 г. отмечается рост числа землетрясений.

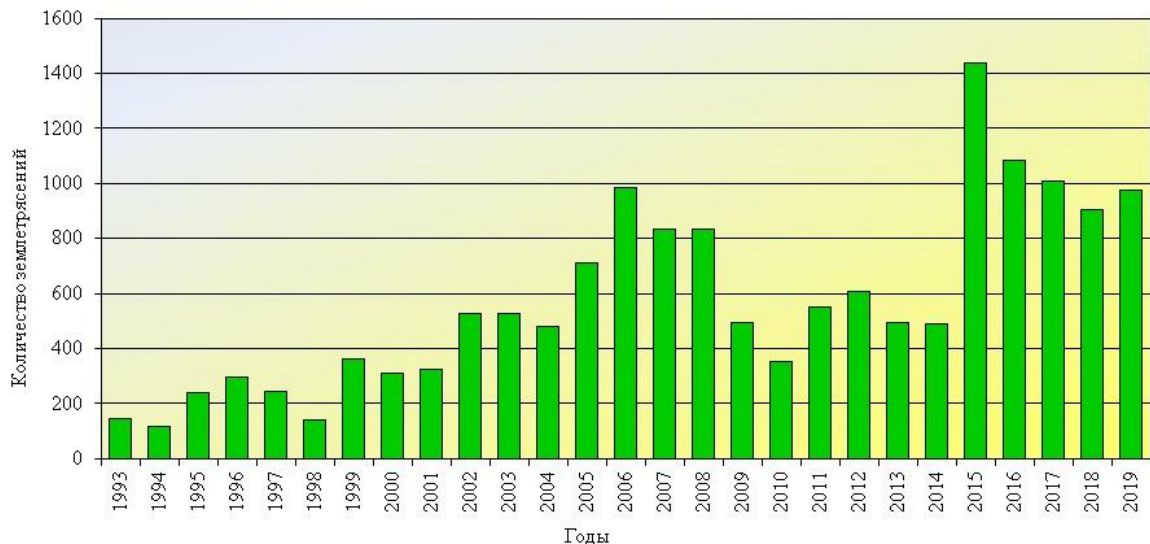


Рисунок 9.16 – График изменения во времени количества землетрясений Европы и смежных областей с магнитудой $M \geq 3,0$ за 1993-2019 гг.

Комплексный анализ параметров сейсмичности. На основе анализа и обобщения сейсмологического мониторинга территории Земли, Европы и Беларуси выполнен комплексный анализ параметров сейсмичности за период 1993-2019 гг. (рисунок 9.17).

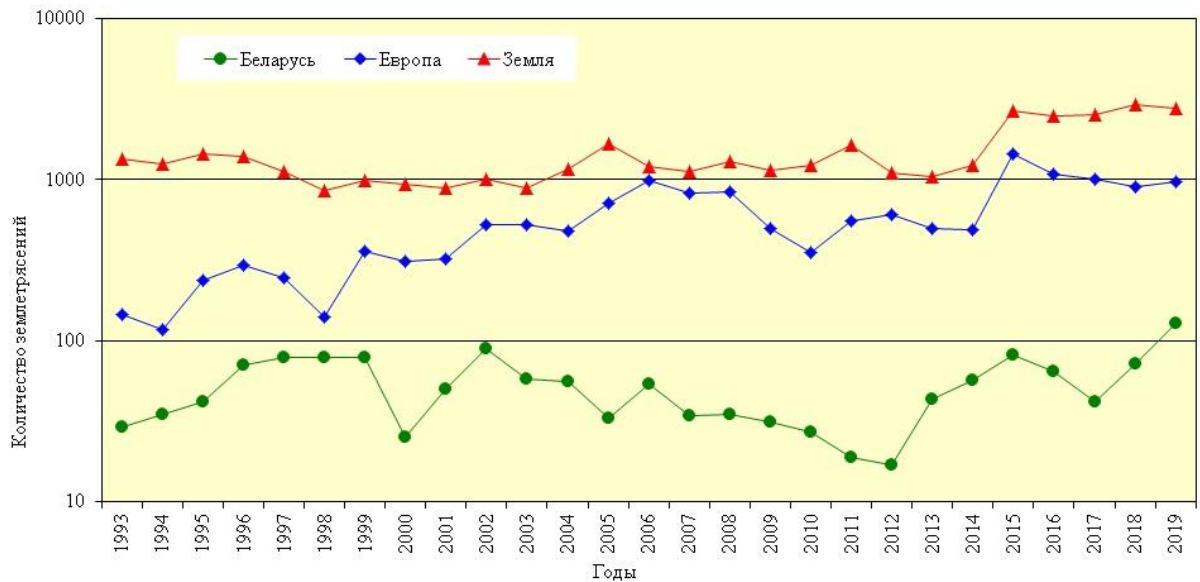


Рисунок 9.17 – График временного хода числа землетрясений на территории Земли, Европы и Беларуси за период 1993-2019 гг.

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 (128) зафиксировано в 2019 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.

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.