

ВЫБРОСЫ МЕТАНА И УГЛЯ И КОСМОФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

к.ф.-м.н. Кириллов А.К. (ИФГП НАН Украины)

Показана залежність частоти раптових викидів метану та вугілля від космофізичних факторів. Запропонований метод прогнозу у наближенні до модифікованого пуассонівського потоку з використанням фазового портрету послідовності цих подій.

OUTBURSTS OF METHANE AND COAL CONCERNING

Kirillov A.K

The dependence of the sudden outbursts at Donbuss mines from space-physical factors is shown. The method of the forecast of this events is offered which based on modified Poisson stream and phase portrait.

Вопросы безопасности в угольной промышленности Донбасса являются первостепенными. Несмотря на проведение операций по дегазации, выбросы метана и угля не прекращаются, особенно при увеличении глубины выработки. Все газодинамические явления (ГДЯ) можно разделить на три большие группы: 1) внезапные выбросы (ВВ) метана и угля; 2) внезапные выбросы, связанные с дистанционным управлением угледобывающих механизмов; 3) выбросы, инициированные взрывными работами [1]. Наиболее опасны ВВ, поскольку выбросы других групп удается избежать, корректируя технологию производства (2), или прогнозировать с достоверностью 100% (3) [2].

Принято считать, что среди космофизических факторов, инициирующих ГДЯ, наиболее вероятны приливообразующие вариации силы тяжести и солнечная активность (СА) [4,5]. Несмотря на статистическую достоверность связи, первый фактор не выдерживает никакой критики со стороны специалистов горной науки, поскольку вариации напряжений, создаваемых приливными деформациями, чрезвычайно малы. Механизмы воздействия солнечной активности на формирование ВВ метана в угольных шахтах до сих пор не получили должного обоснования. Предполагается, что СА может приводить изменениям скорости вращения Земли [6].

В данной работе изучены временные ряды таких событий как выбросы метана и угля, зарегистрированных официальной статистикой в Донецком угольном бассейне, и связь их с указанными выше космофизическими факторами. В отличие от предыдущих исследований вместо индекса – чисел Вольфа, использовались данные по геомагнитной возмущенности и полярности межпланетного магнитного поля (ММП). Цель исследования – обоснование необходимости учета состояния «космической погоды» в прогнозе внезапных выбросов угля и газа при проведении работ на выбороопасных пластах угольных шахт.

Данные и методы

Данные о датах выбросов, их мощности были взяты из отчетов Мак НИИ Министерства угольной промышленности Украины (г. Макеевка) за период 1975-2003 гг. Анализировались выбросы метана и угля двух видов - внезапные выбросы и выбросы, инициированные при дистанционном управлении механизмами при добыче угля. Построены распределения частоты выбросов по месяцам внутри года, относительно фаз Луны с интервалом в 0,2, по интервалам между последовательными выбросами и др.

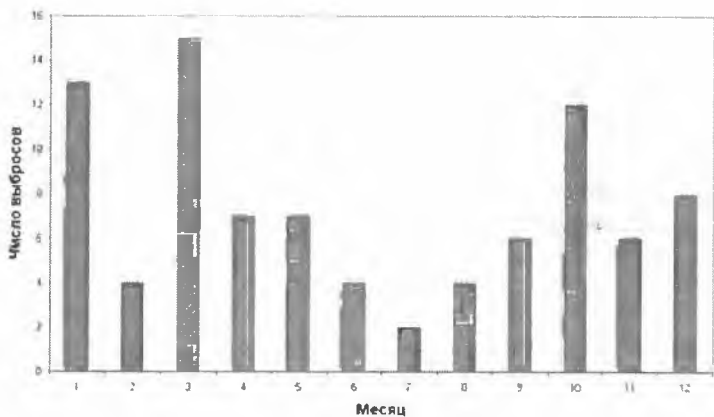
Рассматривалась также связь ВВ с полярностью межпланетного магнитного поля (ММП), магнитными бурями с внезапным началом. В методе наложенных эпох (МНЭ) в качестве реперного взят день смены полярности секторной структуры ММП. Во втором варианте МНЭ, используемого для анализа связи выбросов с полярностью ММП, рассматривалось распределение полярности ММП относительно момента выброса. В обоих случаях взят интервал ± 5 суток относительно реперного дня. Анализировались как данные измерений ИСЗ (Боулдер), так и данные наземных измерений (ИЗМИРАН).

При построении спектров мощности методом БПФ рассматривались временные ряды длительностью от 5840 (1975-1990 гг.) до 4419 (1991-2003гг.) с разбиением на отрезки от 512 до 2048 в различных вариантах анализа. Использовалось сглаживание окном Хэммига и 53хТьюки [7] в частотной области.

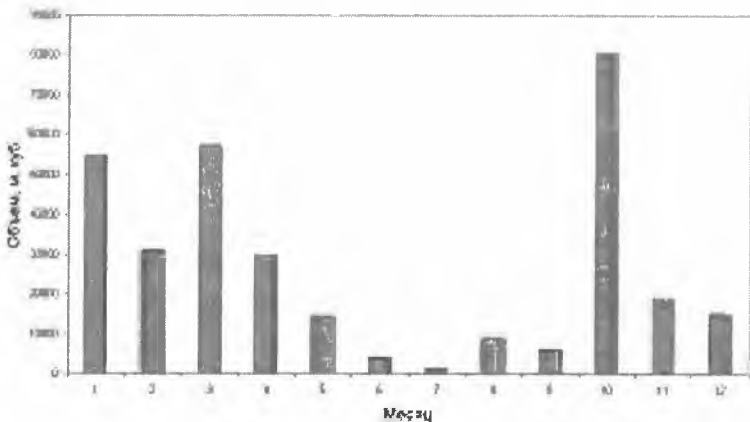
Основные результаты

Сезонная зависимость. ГДЯ может быть обусловлена как естественными причинами, так и производственными. Планирование по месяцам, кварталам и ежегодная отчетность, может приводить к различной напряженности технологических процессов добычи угля и как следствие появляется трехмесячная и годовая зависимость ГДЯ. Известно, что повышенная геомагнитная возмущенность наблюдается в окрестности дней равноденствия.

Представленные на рис. 1а гистограммы указывают на повышенную частоту внезапных выбросов в марте и октябре за 1991 – 2003 гг. За тот же период для выбросов, инициированных механизмами, наблюдается поквартальная зависимость. То же самое имеет место и для полного объема метана, выделившегося при выбросах (Рис.1б). В октябре имели место самые мощные события, связанные с ГДЯ. Геомагнитные возмущения, которые вызываются возмущениями солнечного ветра в окрестности Земли, могут непосредственно влиять на человека (человеческий фактор) или на литосферу и, как следствие, на частоту выбросов метана и угля в шахтах. В рамках данной гипотезы невозможно объяснить максимум в распределении, приходящийся на январь.



(а)



(б)

Рис. 1 Распределение количества внезапных выбросов (а) и объема метана при выбросах (б) в течение календарного года за период 1991-2003 гг.

Итак, имеются косвенные доказательства зависимости частоты внезапных выбросов от геомагнитной возмущенности, обусловленной солнечной активностью. Для других видов выбросов метана этого не наблюдается. Поэтому в дальнейшем при анализе связи выбросов с солнечной активностью рассматривались только внезапные выбросы.

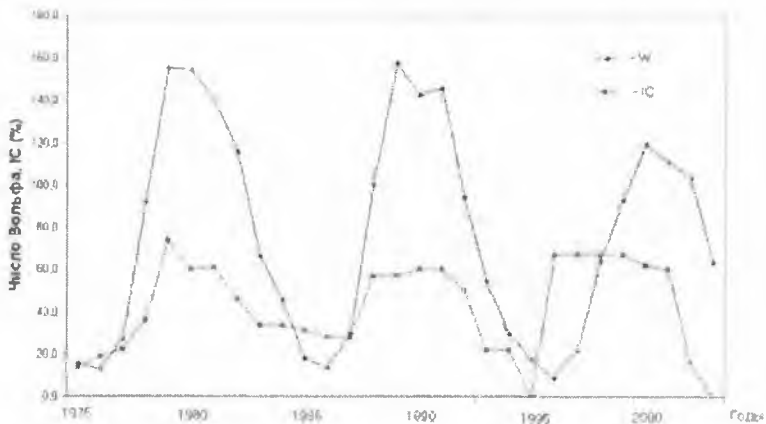
Распределение ВВ в 11-летнем цикле солнечной активности

Применение метода наложенных эпох для индекса A_p не показало зависи-

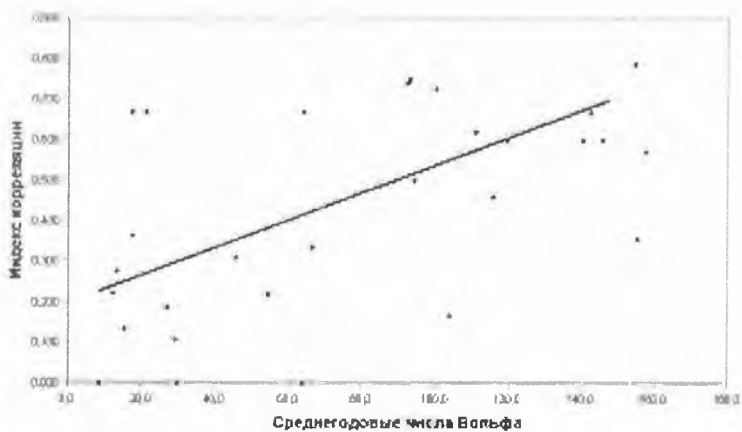
мости ВВ от геомагнитной возмущенности в интервале ± 3 суток относительно реперного дня. Тем не менее, ВВ происходили при повышенной геомагнитной возмущенности (среднее фоновое значение $A_p \approx 16$ нТл). Проводить анализ прямого соответствия частоты выбросов с числами Вольфа проводить нельзя, так как с 1991 г. угольная промышленность Донбасса переживала сложные времена. Даже за весь период с 1975 г. невозможно обеспечить однородность данных. Изменялось количество шахт и интенсивность их эксплуатации. Поэтому предложен следующий метод: сравнить выбросы, которые произошли за отдельный год с магнитными бурями с внезапным началом. Дело в том, что не все магнитные бури могут обуславливать отклик в атмосфере и биосфере. Известно, что иногда слабая суббуря может создать эффекты более значительные, чем большая магнитная буря, но каждая из бурь может быть временным репером вспышечных событий на Солнце или прохождением границы корональной дыры и ММП через земную магнитосферу. Более эффективными оказываются бури с внезапным началом, каталог которых имеется в Мировом центре данных в г.Москва. Мы воспользовались им для анализа наших данных по внезапным выбросам. Считалось, что выброс обусловлен магнитной бурей, если он отстоит от момента начала бури не более, чем на три дня. После подсчета таких соответствий определялась их доля среди всего числа внезапных выбросов метана за текущий год (индекс корреляции IC). Построенный по этим данным график (Рис.2а) показывает хорошую положительную корреляцию с высотой максимумов 11-летнего цикла и, тем самым, подтверждает, что значительная часть ГДЯ обусловлена вариациями солнечной активности и космической погоды. Получена положительная корреляция количества ВВ с фазой 11-летнего цикла СА ($R=0,66$, $P>0,95$) на протяжении 21-23 циклов (Рис. 2б).

Связь с лунно-солнечными приливами и фазами Луны Согласно [4] выбросы метана и угля с высокой достоверностью определяются вариациями силы тяжести лунно-солнечного происхождения. Наблюдаемые в течение суток два приливных горба могут инициировать деформации горных пород, приводящих к различным газодинамическим явлениям при горных разработках. Кроме полусуточной и суточной волны имеются периодические составляющие 13,66 суток, 27,55 сут, 18,6 года, связанные с движением Луны и ее орбиты. Наибольшую амплитуду имеют сизигийные приливы, совпадающие с новолуниями и полнолуниями. Если выбросы метана связаны с приливами, они должны чаще всего наблюдаться именно в эти фазы.

Связь с лунно-солнечными приливами и фазами Луны Согласно [4] выбросы метана и угля с высокой достоверностью определяются вариациями силы тяжести лунно-солнечного происхождения. Наблюдаемые в течение суток два приливных горба могут инициировать деформации горных пород, приводящих к различным газодинамическим явлениям при горных разработках. Кроме полусуточной и суточной волны имеются периодические составляющие 13,66 суток, 27,55 сут, 18,6 года, связанные с



(a)

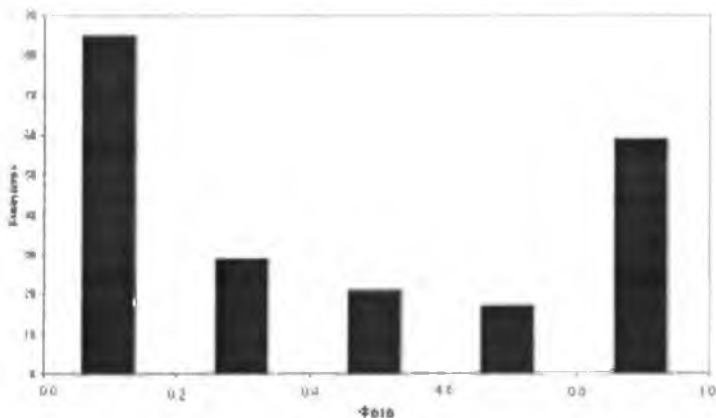


(б)

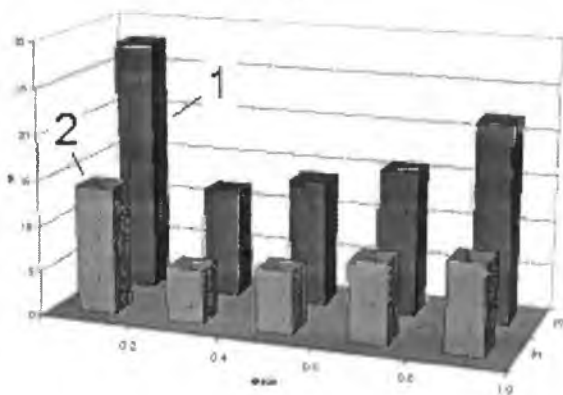
Рис. 2. Индекс корреляции ВВ и магнитных бурь с внезапным началом в 11-ти летних циклах солнечной активности (а); зависимость индекса корреляции от уровня солнечной активности (чисел Вольфа) (б).

движением Луны и ее орбиты. Наибольшую амплитуду имеют сизигийные приливы, совпадающие с новолуниями и полнолуниями. Если выбросы метана связаны с приливами, они должны чаще всего наблюдаться именно в эти фазы.

Действительно, для всего исследуемого временного интервала 1975-2003 гг. частота внезапных выбросов имеет максимумы вблизи фаз ноль (новолуние) и единица (полнолуние). При этом, вблизи новолуния максимум превышает максимум вблизи полнолуния (Рис.3). Если рассматривать



(а)



(б)

Рис. 3. Распределение количества ВВ метана по фазам Луны за периоды 1975-1990 гг. (а) и 1991-2003 гг. (б). На рис. 3б - 1 -- количество ВВ, 2 -- количество случаев, когда ВВ происходили в секторе с отрицательной полярностью межпланетного магнитного поля.

угловое распределение, то интервал фаз 0,2 соответствует углу ± 50 градусов и ± 3 суток относительно указанных фаз. Из 208 событий за период 1975-1990 годы 70% попало в указанные секторы. Для 1991-2003 годов этот эффект выражен в меньшей степени. Вблизи новолуний и полнолуний произошло 54% внезапных выбросов метана. Отметим, что на рис 3б. показано также распределение этих событий по секторам ММП с отрицательной полярностью (на переднем плане). Заметна корреляция высоты столбцов гистограммы для обеих величин. Это означает, что вблизи новолуний и полнолуний Земля чаще находилась в секторах с отрицательной

полярностью, чем в другие лунные фазы. Объяснение зависимости от секторов ММП будет дано ниже.

Внезапные выбросы и межпланетное магнитное поле

Известно, что при пересечении границ секторной структуры изменяются многие атмосферные параметры: давление, индекс атмосферной циркуляции, геомагнитная возмущенность [8]. Если происходит смена знака компоненты ММП $B_z < 0$, то возникают условия, при перезамыкании геомагнитного поля с межпланетным, допускающие увеличение переноса энергии в магнитосферу в 10^4 раз по сравнению с условиями, когда индукция ММП имеет положительный знак. По этой причине можно ожидать более возмущенные условия на всех уровнях атмосферы в такие периоды. Мы выделили среди всех событий выбросов те из них, которые произошли в дни с положительной, отрицательной полярностью и в дни, совпадающие с моментами смены знака полярности ММП. За период 1991-2003 гг. получена зависимость от знака полярности сектора для ВВ с надежностью $\alpha < 0,056$. Значительно больше таких выбросов происходило в секторах с отрицательной полярностью, чем в секторах с противоположной полярностью (Рис. 4а). Для выбросов, инициированных механизмами, такой зависимости от знака полярности не обнаружено (Рис. 4б).

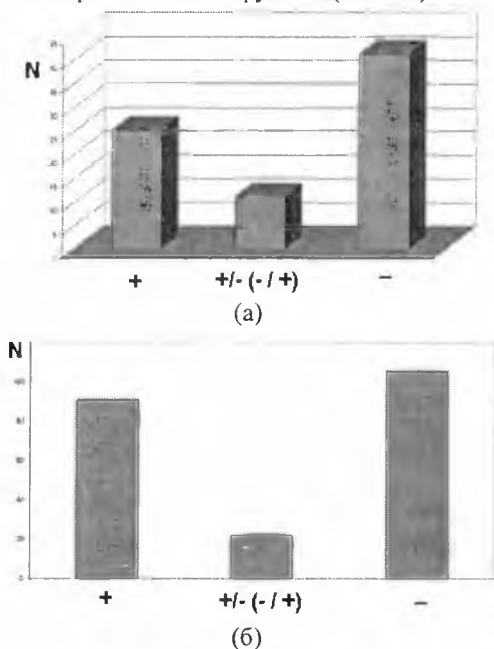
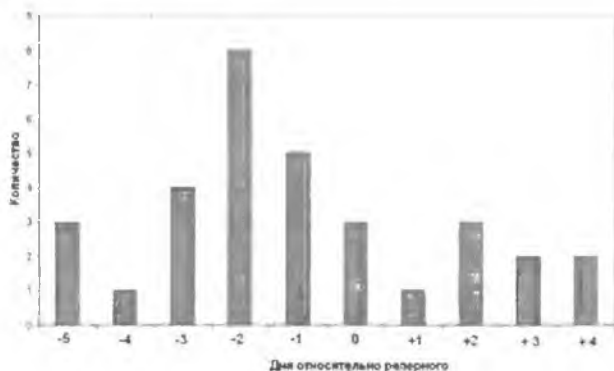


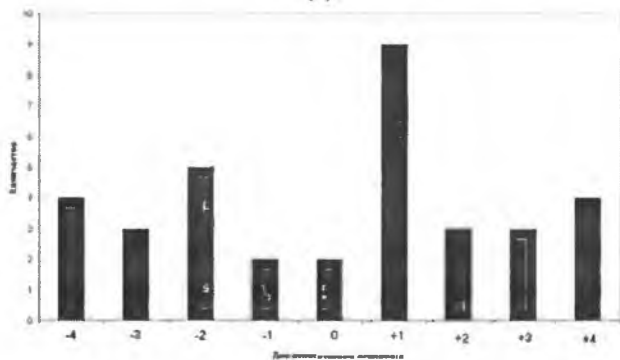
Рис. 4. Распределение ВВ (а) и выбросов метана и угля при дистанционном управлении механизмами (б) по секторам межпланетного магнитного поля за 1991-2003 гг. Средние столбцы соответствуют выбросам в дни смены полярности ММП.

Возвращаясь к результатам анализа внезапных выбросов и лунных фаз, можно сделать вывод, что максимумы ВВ вблизи новолуний и полнолуний на рис.3 могут быть обусловлены просто тем, что в эти моменты Земля находилась в секторах ММП с отрицательной полярностью, что приводило к повышенной геомагнитной возмущенности. Как следствие – увеличение вероятности внезапных выбросов.

Дальнейшие исследования были проведены для обоих отрезков времени методом наложенных эпох. Анализировался переход Земли как из сектора с положительной полярностью в отрицательный, так и обратный переход. Результаты показаны на рис.5. За один-два дня до момента смены знака $-/+$ возрастает вероятность внезапных выбросов метана. При переходе из сектора с положительной полярностью максимум в распределении выбросов соответствует первому дню после реперного. Гистограммы аналогичны для обоих временных отрезков – до и после 1991, но для периода 1975-1990 гг. ширина распределения относительно реперного дня больше, чем за период 1991-2003 гг.



(а)



(б)

Рис. 5. Распределение ВВ в окрестности границ секторов межпланетного магнитного поля (1991-2003 гг.): (а) – граница $-/+$, (б) – граница $+/-$.

Действительно, моменты смены полярности секторной структуры ММП могут быть индикаторами повышения вероятности внезапных выбросов.

При рассмотрении в качестве реперного дня дату выброса получено доказательство значимости знака полярности ММП на уровне $\alpha = 0,006$ для моментов выбросов метана и угля. На рис.6 представлены данные для периода 1991-2003 гг. и спутниковых данных для ММП. Выяснилось также, что этот вывод справедлив только для нечетных циклов солнечной активности. Приведенная выше цифра относится к 21 циклу (данные за 1978-1984, общее количество ВВ, $N = 111$).

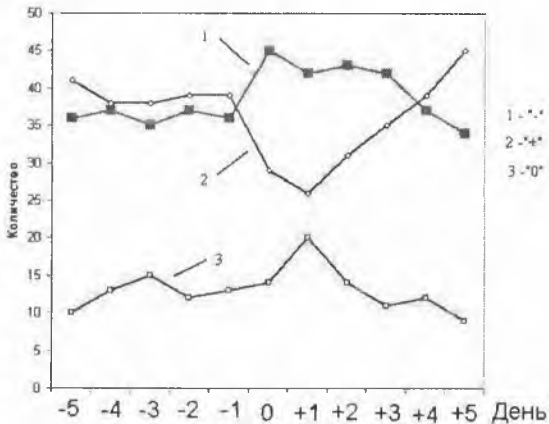


Рис. 6. Распределение дней с различной полярностью секторов ММП относительно дат внезапных выбросов. Реперный день – дата ВВ (1991-2003гг.).

Спектральный анализ временных рядов. При построении спектров мощности все данные о ВВ были разделены на два временных отрезка, указанных выше. На рис.7 и рис.8 показаны результаты для обоих интервалов.

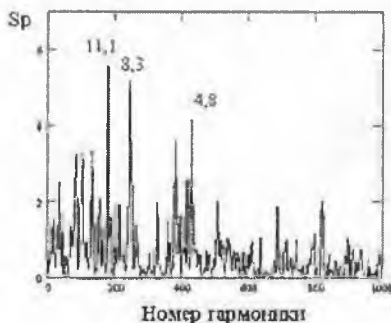


Рис. 7. Спектр мощности внезапных выбросов (1975-1990гг.) Отмечены периоды трех самых мощных периодических составляющих (в сутках).

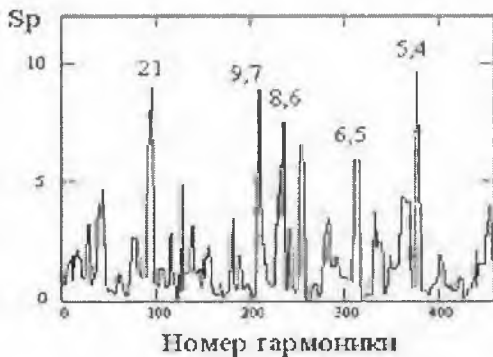


Рис.8. Спектр мощности внезапных выбросов (1991- 2003 гг.). Отмечены периоды пяти самых мощных периодических составляющих (в сутках).

Отметим, что кроме отмеченных в спектрах периодических составляющих, характерным периодом для внезапных выбросов является период $P \approx 30,5$ сут.

Внезапные выбросы и вращение Земли. Предполагалось также, что вариации скорости вращения Земли тоже могут приводить к выбросам метана и угля, а, следовательно, и к авариям, связанным с ГДЯ [4]. Вековое замедление скорости вращения Земли происходит в результате действия лунно-солнечных приливов и для периода вращения T составляет $(1-2) \cdot 10^{-3}$ секунды за столетие. Вторая компонента вариации вращения имеет 60-летнюю составляющую с амплитудой $(1,5-2) \cdot 10^{-3}$ сек. Сезонные колебания продолжительности суток связывают с перемещением воздушных масс в земной атмосфере и могут достигать $\pm 0,001$ сек. Кроме этих составляющих наблюдаются нерегулярные изменения и резкие скачки скорости вращения до 10^{-4} с/сут, природа которых не имеет полного объяснения [9]. Предполагается, что неприливное изменение продолжительности суток имеет две основные причины. Первая из них связана с колебательно вращательными движениями, возникающими в системе ядро-оболочка Земли, а вторая обусловлена дополнительным вращением, задаваемым системе магнитосфера-атмосфера-оболочка Земли солнечной активностью.

Достаточно подробно связь неравномерности вращения Земли и активными процессами на Солнце исследовали Ю.Д. Калинин и В.М. Киселев (г. Красноярск) [9]. Анализ низкочастотных (с характерными временами не меньше 11 лет) изменений чисел Вольфа W и длительности земных суток δP показал, что рост солнечной активности сопровождается увеличением скорости суточного вращения Земли (длительность суток уменьшается). В изменениях длительности суток присутствует гармоническая компонента, не связанная с изменениями солнечной активности, а возникающая, вероятнее всего, в результате азимутальных колебаний системы ядро-оболочка.

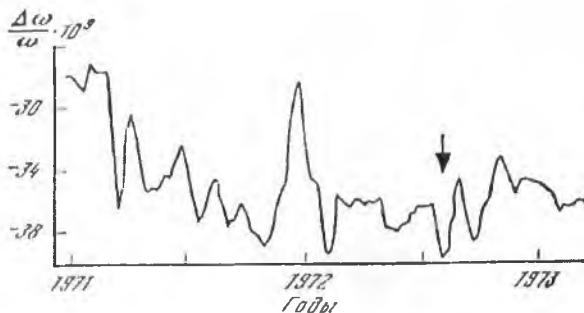


Рис. 9. Вариации угловой скорости вращения Земли в 1971-1973 гг. после исключения приливной и сезонных составляющих согласно Н.С.Сидоренкова [10].

Один из примеров связи событий на Солнце и скоростью вращения Земли представлен Н.С. Сидоренковым за 1971-1973 гг. На рис.9 (из [10]) видно, что вблизи момента большой вспышки на Солнце в начале августа и после наблюдалось заметное возмущение угловой скорости. Оно началось с уменьшения ω и имело колебательный характер. Отмечалось два полных колебания с периодом 1,5 мес. и амплитудой $2 \cdot 10^{-4}$ с., что соответствует относительному изменению угловой скорости $\Delta\omega/\omega \cong 3,3 \cdot 10^{-8}$ за сутки. В 1971 г. Земля вращалась очень неравномерно, в июле-августе наблюдались возмущения, напоминающие флуктуации ω в июле-сентябре 1972 г. Конец 1971 г. отличался резкой аномалией в поведении ω , а именно большим и длительным ее увеличением. Совпадение отмеченных аномалий и скачков в развитии процессов на Солнце, межпланетном пространстве и на Земле не являются случайными [10].

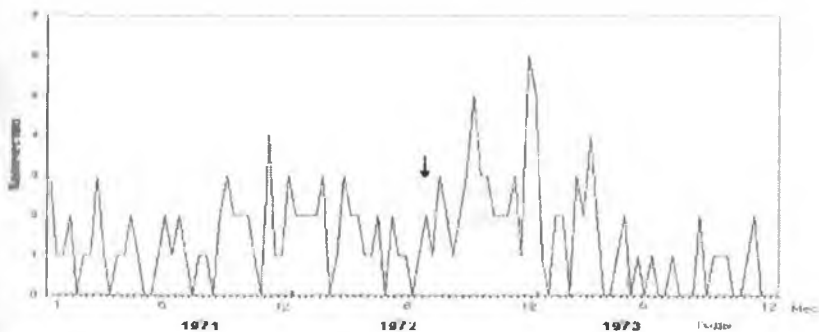


Рис. 10. Распределение внезапных выбросов в Донбассе в 1971-1973 гг. По оси ординат указано количество выбросов за декаду. Стрелкой отмечен момент солнечной вспышки в начале августа 1972 г.

По имеющимся в нашем распоряжении данным был построен ряд, отражающий количество внезапных выбросов на шахтах Донбасса за период 1971-1973 г.г. (Рис. 10) Каждая точка соответствует количеству выбросов за отдельную декаду месяца. При сравнении этого ряда и данных по флуктуациям вращения Земли можно заметить достаточно хорошее соответствие рядов. Стрелками отмечен момент большой вспышки в августе 1972 г.

Существенную роль в процессах воздействия Солнца на неравномерность вращения Земли играет секторная структура межпланетного магнитного поля и изменения характеристик солнечного ветра (его скорости и плотности). О.Буркард рассмотрел 76 случаев прохождения Земли через границы секторов ММП за период 1962-1968 гг. Независимо от того, как меняется знак ММП после пересечения границы сектора, вращение Земли ускоряется, а спустя четыре дня - замедляется (см. рис.11).

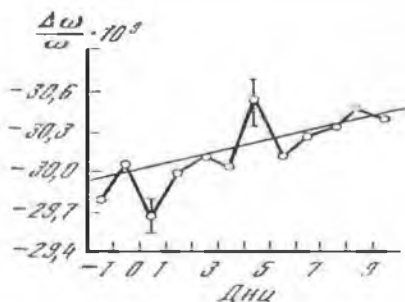


Рис. 11. Вариации скорости вращения Земли при пересечении границы секторов ММП [10]).

Для объяснения этого явления предполагается механизм, рассматривающий в качестве причины изменения скорости вращения Земли воздействие солнечного ветра на магнитосферу Земли. Возрастание скорости и плотности приводит к мгновенному уменьшению радиуса магнитосферы. Согласно закону сохранения момента импульса скорость вращения должна резко увеличиться. Когда давление солнечного ветра упадет, магнитосфера (а вместе с ней и вся Земля) снова замедляет свое вращение. Не следует исключать и электромагнитные процессы, возникающие при этом [9, 11]. Данный механизм представляет интерес еще и потому, что с вариациями вращения Земли связывают и землетрясения. Количество землетрясений и их мощность изменяются в зависимости от фазы 11-летнего цикла солнечной активности [12].

Проблема прогноза внезапных выбросов осложняется отсутствием строго выраженных периодических составляющих. вмешательством в технологический процесс с помощью системы противовыбросных мероприятий при добыче угля в шахтах, многофакторностью внешних воздействий. Не исключая рассмотренные выше факторы – солнечные вспышки, сек-

горная структура ММП и лунно-солнечные приливы, необходимо учитывать также свойства временного ряда. Информацию об этом может дать распределение последовательности выбросов. Гистограмма, характеризующая это распределение показана на рис. 12 для внезапных выбросов при добыче угля в шахтах Донбасса.

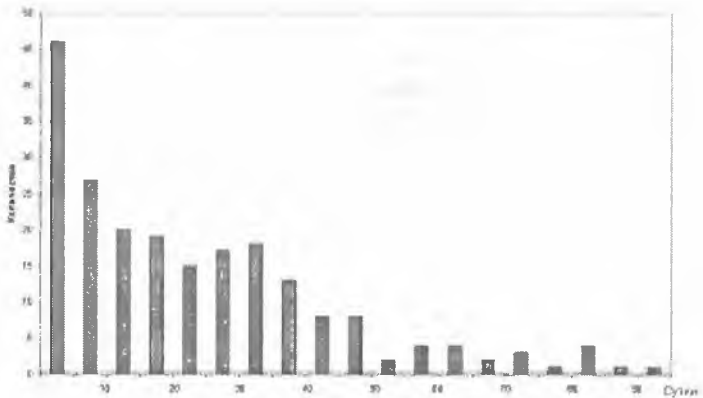


Рис. 12. Гистограмма распределения интервалов между последовательными внезапными выбросами (1975-1990 гг.).

В отличие от этого распределения, гистограмма для выбросов, инициированных при дистанционном управлении механизмами, имеет экспоненциальное распределение вида

$$p(t) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где $\tau = 12$ сут. Поэтому возможно прогнозирование времени ожидания t между последовательными выбросами с помощью датчика случайных чисел по стандартной методике, известной в теории случайных процессов для пуассоновского процесса. В нашем случае возможна аппроксимация распределения внезапных выбросов с учетом периодической составляющей. Тогда гистограмму можно аппроксимировать зависимостью

$$p(t) = p_0 \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right\} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где $\tau = 20$ сут., $T = 30,5$ сут. для отрезка времени 1975-1990 гг. Далее прогнозирование проводится методом Монте-Карло.

Информацию о присутствии в прогнозируемом временном ряду наиболее существенных периодических составляющих можно получить после фильтрации его спектра мощности. На рис.13 приведены примеры фазовых портретов двух временных рядов последовательности внезапных выбросов.

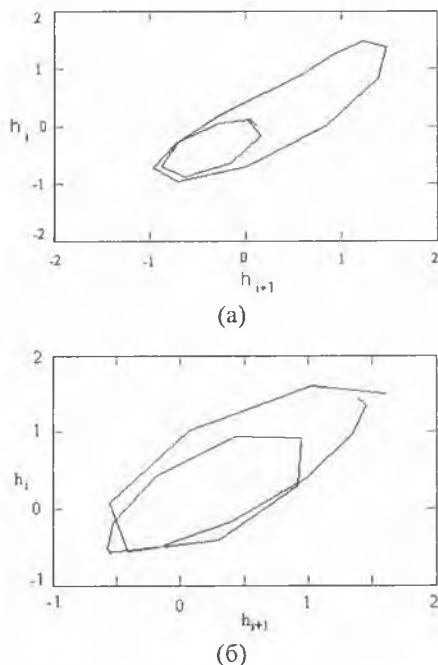


Рис. 13. Фазовые портреты последовательности внезапных выбросов на шахтах Донбасса в 1975-1990 гг. (а) и 1991-2003 гг. (б) после фильтрации спектров мощности. По осям отложены относительные единицы.

Выводы

Полученное методом наложенных эпох распределение ВВ относительно момента смены полярности секторной структуры ММП подтверждает возрастание количества выбросов при пересечении Землей границы и в периоды ее нахождения в отрицательном секторе. Физическим механизмом, объясняющим это явление, может быть резкое изменение угловой скорости вращения Земли на уровне $3 \cdot 10^{-8}$ сек/сутки, при котором значения вариаций ускорения вращения Земли достигают величин, сравнимых с приливообразующим ускорением. Именно в эти моменты возрастает поток тепловых нейтронов, связанных с выделением радона из литосферы [13].

Предложен метод прогноза этих событий в приближении модифицированного пуассоновского потока с использованием фазовых портретов последовательности ВВ.

Благодарности: Автор выражает искреннюю благодарность А.Д. Алексееву за постановку задачи, Б.М. Владимирскому за плодотворное обсуждение результатов данного исследования и критику, А.И. Резниченко и А.А. Рубинскому за предоставление данных по газодинамическим явлениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. – М.: ГНТИ, 1961. – 363 с.
2. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. – М.: Наука, 1978. – 310с.
3. Агафонов А.В. Способы и средства обеспечения безопасности проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам. – Донецк: «Донбасс», 1998. – 231 с.
4. Приходько С.Ю. // Обгрунтування методу прогнозування викидонебезпеки вугільних пластів при їх розробці з урахуванням впливу космогенічних факторів / Автореф. канд. дисс., Днепропетровск.-2002. – 16 с.
5. Зуев Л.А., Приходько С.Ю. О взаимосвязи частоты внезапных выбросов с космогенными и геофизическими факторами // Уголь Украины. – 1999. - №8. – С.35-37.
6. Challinor R. A. Variations in the rate of rotation of the Earth // Science. – 1971.- V. 172. - N 3987. - P.36-39.
7. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. – 540 с.
8. Солнечно-земные связи, погода и климат. Ред. Б. Мак-Кормак и Селига. – М.: Мир, 1982. – 382 с.
9. Киселев В.М. Неравномерность суточного вращения Земли. – Новосибирск: Наука, 1980. – 160с.
10. Мирошниченко Л.И. Солнечная активность и Земля. – М.: Наука, 1981. – 144с.
11. Ершкович А.И., Скуридин Г.А., Шалимов В.П. Некоторые проблемы физики магнитосферы. / Межпланетная среда и физика магнитосферы. – М.: Наука, 1972. – С.3-25.
12. Дода Л. Геосейсмическое эхо солнечных бурь, или Землетрясения рождаются на Солнце // Новости космонавтики. – 2003. - №245
13. Володичев Н.Н. и др. Земная кора – активный источник нейтронов // Вестник МГУ, сер. физика, астрономия. – 2002. - N 5. - С.69-73.