

В современных моделях формирование солнечного цикла рассматривают как циклический процесс изменения структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца. Дифференциальное вращение Солнца и меридиональная циркуляция определяют динамику магнитного поля солнечного цикла. Выделим основные процессы, формирующие динамику магнитного поля.

1. Дифференциальное вращение усиливает и преобразует магнитное поле солнечного диполя (полярное поле) в широтное тороидальное магнитное поле. Тороидальное поле возникает и хранится в основании зоны конвекции в области тахоклина ( $r \sim 0.7R_s$ ). 2. Силовые трубки тороидальных потоков поднимаются вверх (в основном, за счет магнитной плавучести) и проявляются вблизи поверхности в виде биполярных групп - солнечных пятен (низкотемпературные области с сильным магнитным полем). Появление магнитных структур на поверхности (в действительности в приповерхностном слое на  $r \approx 0.96R_s$ ) является основным фактором, определившим динамику полярного поля. 3. На поверхности при воздействии дифференциального вращения широтные магнитные поля возникающих магнитных структур распространяются в меридиональном направлении к полюсу (скорость  $\sim 10-15$  м/с), формируя новое полярное (аксиальное) поле.

4. Меридиональная циркуляция направляет магнитный поток полярного поля в зону источника (в область тахоклина), где новое тороидальное поле возникает как результат дифференциального вращения полюидального поля. В области источника тороидальный поток распространяется в меридиональном направлении к экватору со скоростью  $\sim 2-3$  град/год. Таким образом, дифференциальное вращение Солнца и меридиональная циркуляция формируют динамику магнитного поля солнечного цикла и периодичность формирования солнечных циклов. Смена знака полярного поля в каждом последующем цикле является типичным проявлением такой цикличности. Меридиональный перенос широтных тороидальных магнитных потоков к полюсу на поверхности и к экватору в источнике (меридиональная циркуляция) является основным исполнителем этой цикличности. Динамику солнечного цикла традиционно связывают с динамикой числа солнечных пятен. Сопоставление динамики параметров меридиональной циркуляции (тороидального поля и скорости) и динамики параметров солнечных циклов (длительность цикла, число солнечных пятен) позволит понять, насколько справедлива предложенная схема динамики солнечной активности [1]. В статье анализируются корреляционные зависимости между параметрами тороидального поля, меридиональной скорости и параметрами солнечного цикла (солнечными пятнами и полярным полем). Для фазы роста и спада активности отдельно анализируется взаимная динамика временных профилей, сравнивается динамика временных градиентов параметров. Для временной динамики тороидального и полярного магнитных полей были использованы данные, представленные в [2]:  $B_{tor}$  (широта  $0^\circ/+45^\circ$ ) и  $B_{pol}$  (широта  $+/-45^\circ - +/-75^\circ$ ). В статье мы используем абсолютную величину (без знака) магнитного поля:  $B_{tor} = \{|B_{tor}| + |B_{tors}|\} / 2$ .  $B_{tor}$  — это среднширотное (широта  $+/- 45^\circ$ ) усредненное по долготе тороидальное магнитное поле. На рис. 1 показана временная динамика тороидального магнитного поля  $B_{tor}$  и числа солнечных пятен SSN, на рис.2 показана временная динамика тороидального магнитного поля  $B_{tor}$  и полярного магнитного поля  $B_{pol}$ .

Широтный профиль скорости меридионального потока  $V_{mer}$  (в кэррингтоновой системе координат) для 21-24 циклов был вычислен по формуле:

$$V_{mer}(Q) = (d \cdot \sin Q + e \cdot \sin^2 Q) \cdot \cos Q$$

$$d = 29.7 \pm 0.3 \text{ м/с}, \quad e = -17.7 \pm 0.7 \text{ м/с}, \quad Q - \text{широта, град.}$$

Эта формула была получена в [3] при анализе динамики магнитных структур солнечных пятен в 23 солнечном цикле по данным магнитограмм полного диска Солнца (космический аппарат ESA/NASA SOHO).

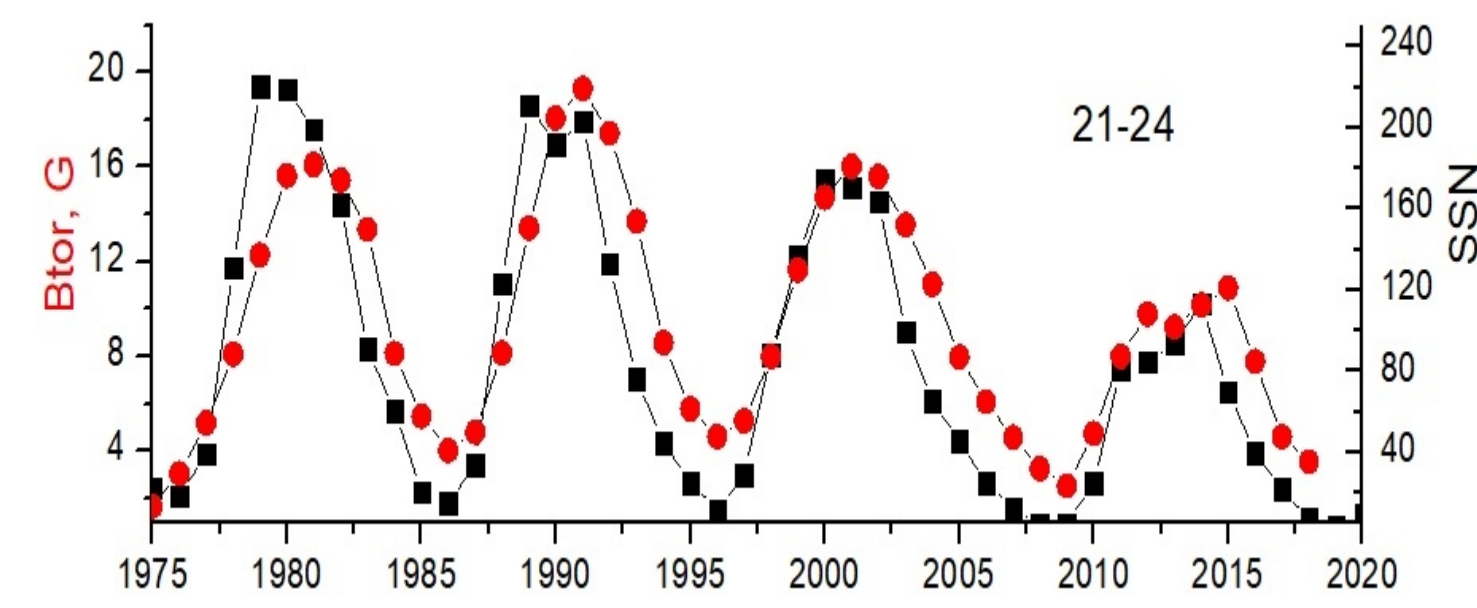


Рис.1 Временная динамика  $B_{tor}$  и SSN

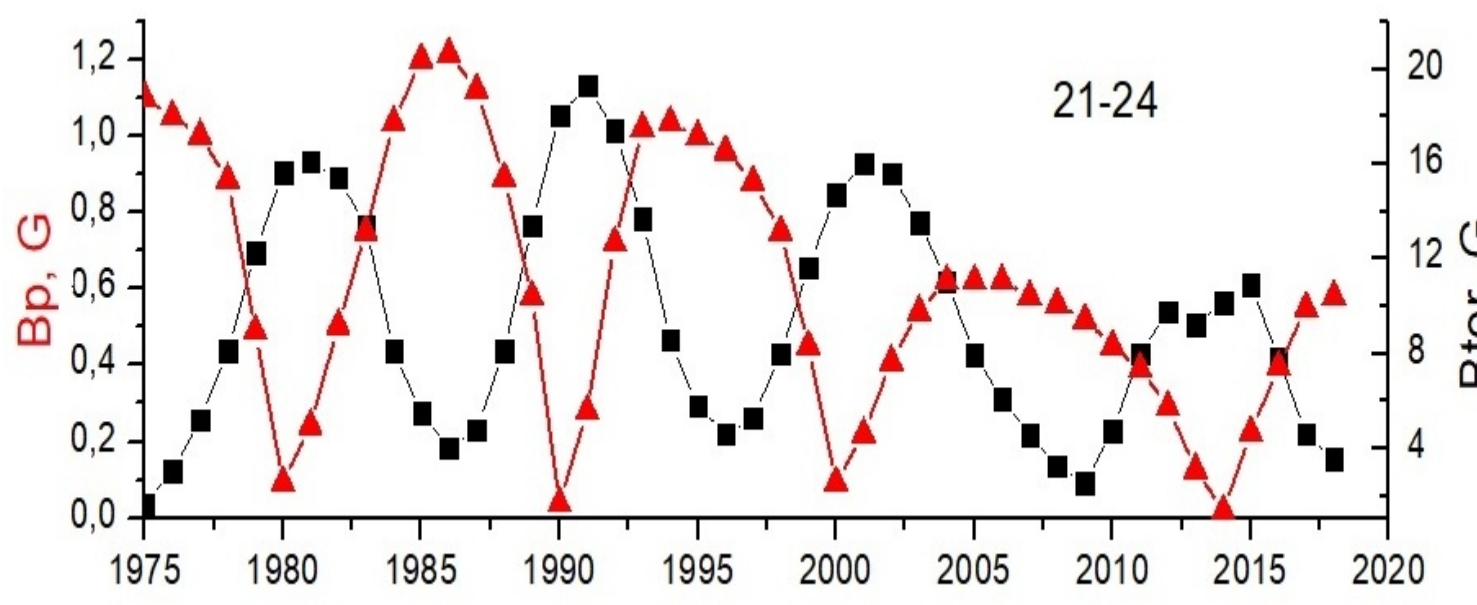


Рис.2 Временная динамика  $B_{tor}$  и  $B_{pol}$ .

- На рис.3 показан широтный профиль меридиональной скорости  $V_{mer}(m/s)$  для 23 цикла (черные значки) и широтный профиль средней меридиональной скорости  $V_{mer}(m/s)$  для фазы роста и спада активности в 21-24 циклах (красные значки). При вычислении использовалась широтная динамика числа солнечных пятен. Отметим, что в [3] для 23 цикла вычислены точечные значения  $V_{mer}$  и  $Q$ , для 21-24 циклов дана зависимость средних для фазы роста и спада значений  $V_{mer}$  от средних значений  $Q$ . Для фазы роста широта изменяется в диапазоне  $\sim 28-32$  град и для фазы спада в диапазоне  $Q \approx 15-18$  град.
- Динамика временных градиентов меридиональной скорости  $V_{mer}$  и тороидального поля  $grB_{tor}$  в цикле определяет динамику параметров полярного поля  $B_{pol}$  и динамику числа солнечных пятен SSN. На рис. 4 показана взаимная динамика градиента меридиональной скорости  $grV_{mer}(t)$  и градиента тороидального поля  $grB_{tor}(t)$  для фазы роста и спада активности. Размерность  $grB_{tor} - G/c/год$ , размерность  $grV_{mer} - m/s^2/год$ . Красным отмечены данные для фазы роста активности (это применяется для всех рисунков).
- Для фазы роста реализуется отрицательная линейная корреляция, увеличение отрицательного градиента  $grV_{mer}$  (скорость уменьшается) сопровождается увеличением положительного градиента  $grB_{tor}$  (скорость увеличивается). Полярное поле  $B_{pol}$  спадает быстрее. Магнитные структуры с большим полем двигаются медленнее.

На рис.7б представлена для максимума последующего цикла связь величин  $SSN_{max}(n+1)$  и  $B_{tor_{max}}(n+1)$  с величиной  $V_{mer}(n)$  в предыдущем цикле (рис. 7 б). Реализуется положительная корреляция  $r \sim 0.9$  для  $SSN_{max}(n+1)$  и  $r \sim 0.8$  для  $B_{tor_{max}}(n+1)$ . Картина подобна известной связи величины полярного поля  $B_{pol}(n)$  и величин  $SSN_{max}(n+1)$  и  $B_{tor_{max}}(n+1)$  (рис.7 б).

Положительная линейная корреляция реализуется между градиентом меридиональной скорости  $grV_{mer}(t)$  и динамикой градиента широты  $grQ(t)$  числа солнечных пятен  $SSN$  (рис.8). Градиент широты показывает скорость дрейфа солнечных пятен  $V_{dr}$  в процессе развития солнечной активности.

Такая положительная корреляция указывает на тесную связь динамики меридиональной скорости  $V_{mer}$  и скорости дрейфа  $V_{dr}$ . Коэффициент корреляции между  $V_{mer}$  и  $V_{dr}$  равен  $r \sim 0.98$  для фазы роста и  $r \sim 0.66$  для фазы спада. Традиционно, динамику скорости дрейфа связывают с динамикой длительности фазы роста и фазы спада активности (рис.9). Реализуется линейная положительная корреляция между  $grQ(t)$  и длительностью фазы роста ( $r \sim 0.9$ ) и фазы спада ( $r \sim 0.9$ ). Линейная положительная корреляция реализуется также между градиентом  $grV_{mer}$  и длительностью фазы роста ( $r \sim 0.98$ ) и фазы спада ( $r \sim 0.97$ ) Эти данные приведены на рис. 9а: для  $grV_{mer}$  — данные 1, для  $grQ$  — данные 2. Интересная особенность в динамике солнечных циклов проявляется в положительной корреляционной связи периодов солнечных циклов и суммой градиентов меридиональной скорости  $grV_{mer}$  (красные значки) для периодов фазы роста и спада ( $r \sim 0.98$ ) и суммой градиентов широты  $grQ$  тороидального поля для периодов фазы роста и спада ( $r \sim 0.82$ ). Эти данные приведены на рис. 9б.

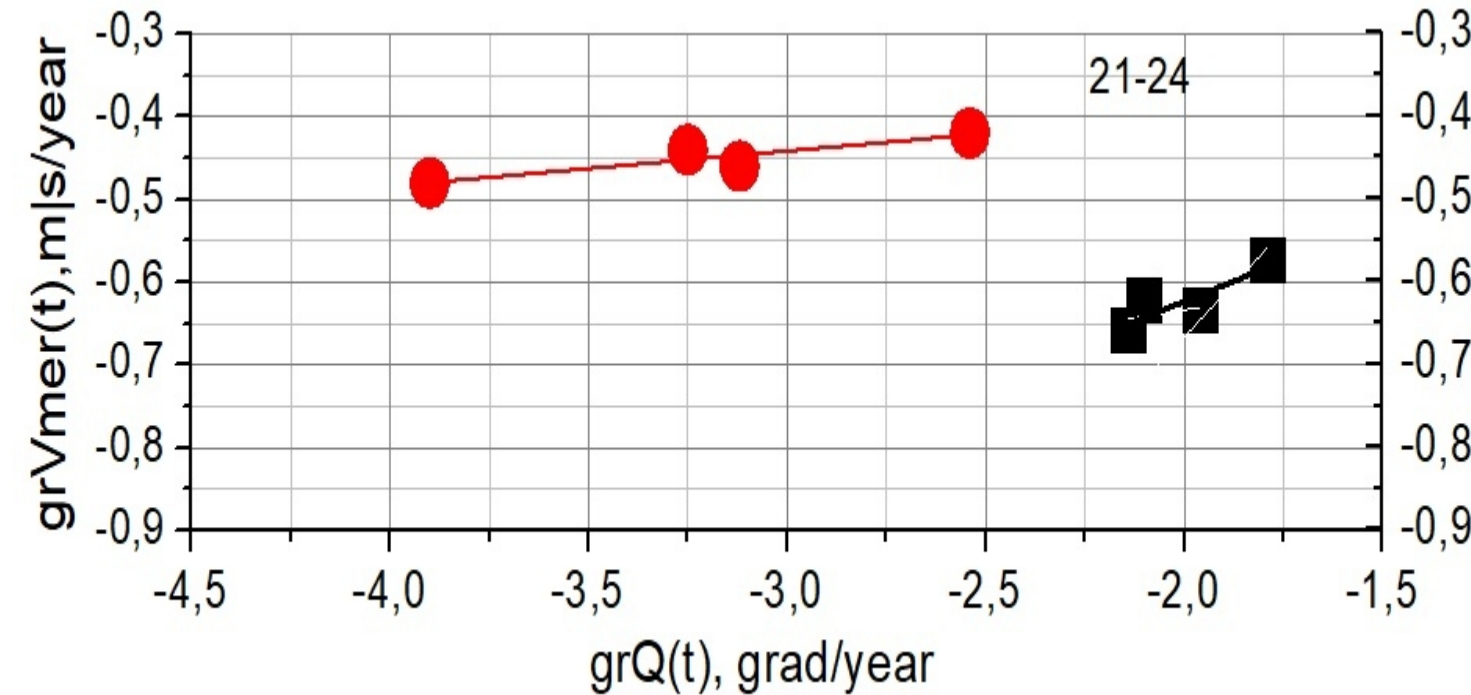
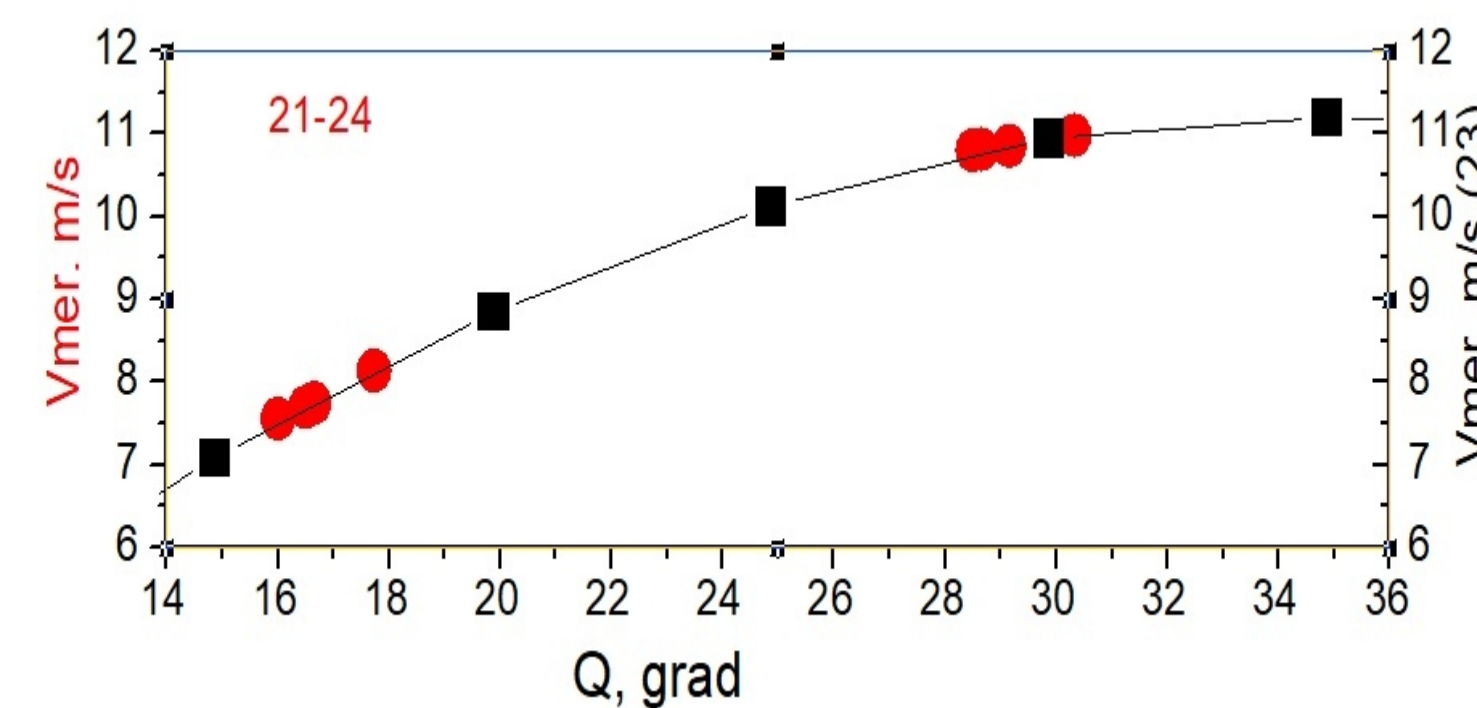
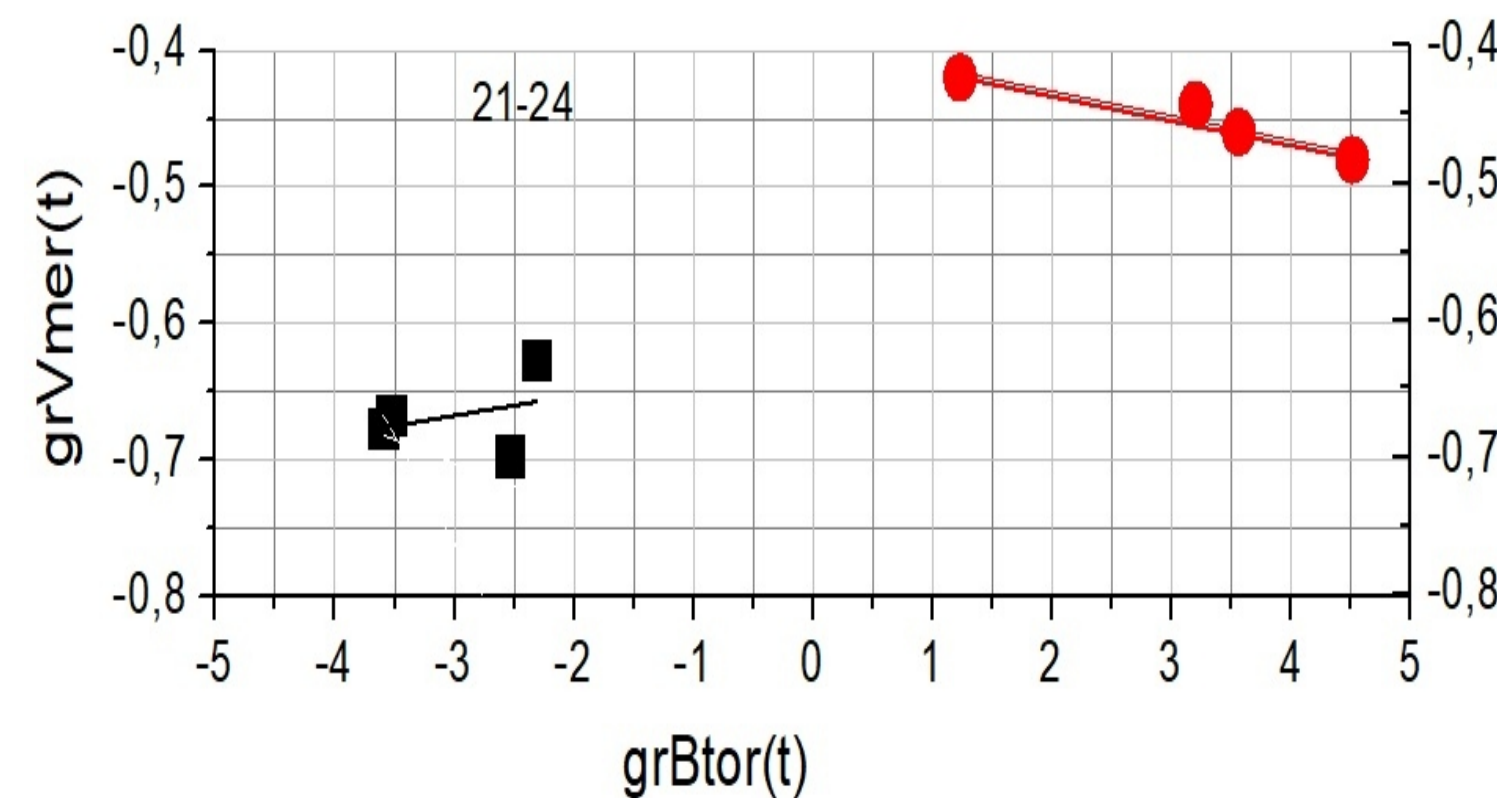


Рис.8 Взаимная динамика градиента меридиональной скорости  $grV_{mer}(t)$  и градиента широты  $grQ(t)$  числа солнечных пятен.

- Для фазы спада реализуется положительная корреляция градиентов  $grV_{mer}(<0)$  и  $grB_{tor}(<0)$ . Новое полярное поле  $B_{pol}$  растет быстрее. Такую динамику  $grB_{pol}$  подтверждает взаимная корреляция  $grB_{pol}$  и  $grV_{mer}$ .

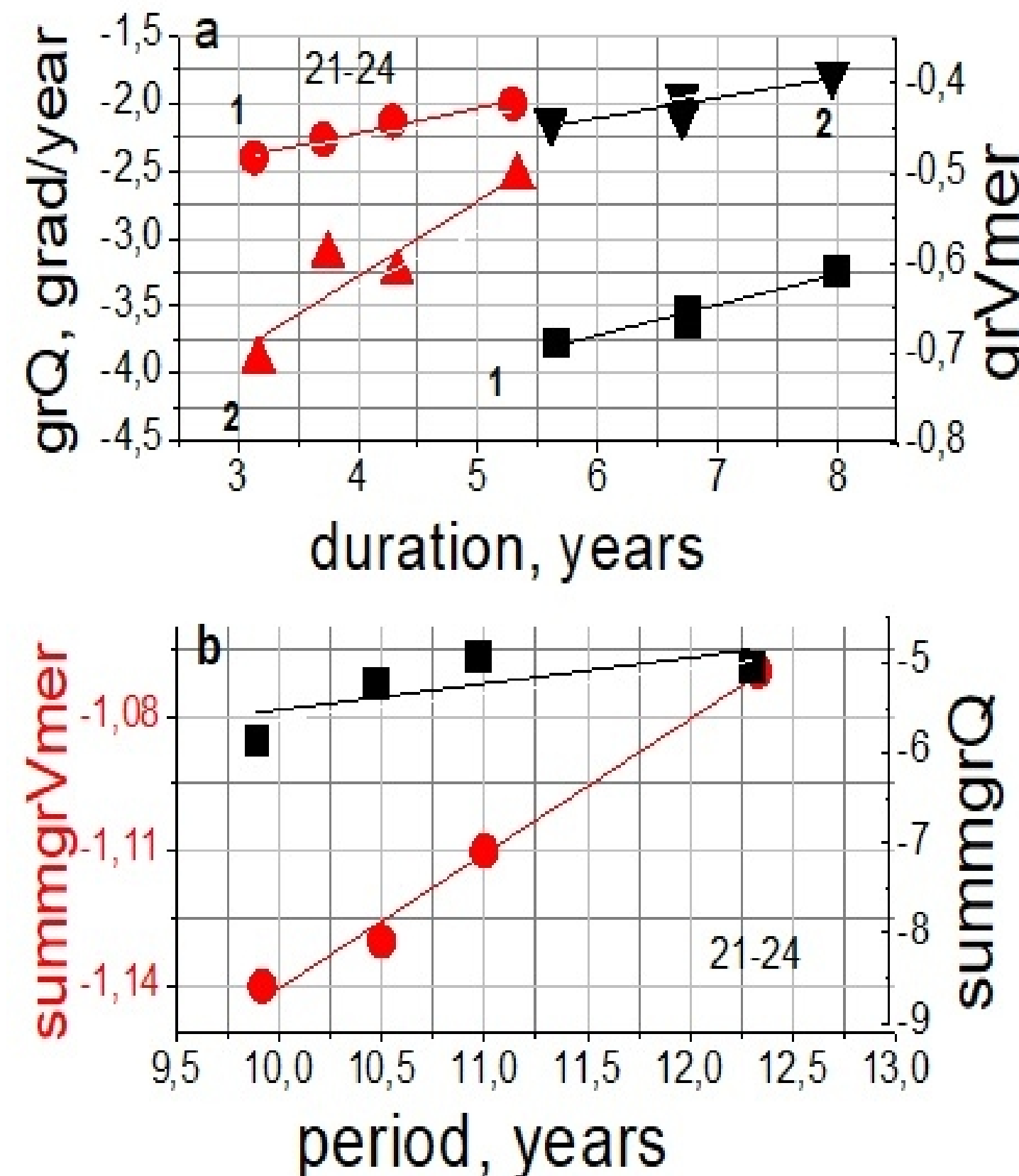


- Рис.3 Широтный профиль меридиональной скорости  $V_{mer}(m/s)$  для 23 цикла (черные значки) и широтный профиль средней меридиональной скорости  $V_{mer}(m/s)$  для фазы роста и спада активности в 21-24 циклах (красные значки).



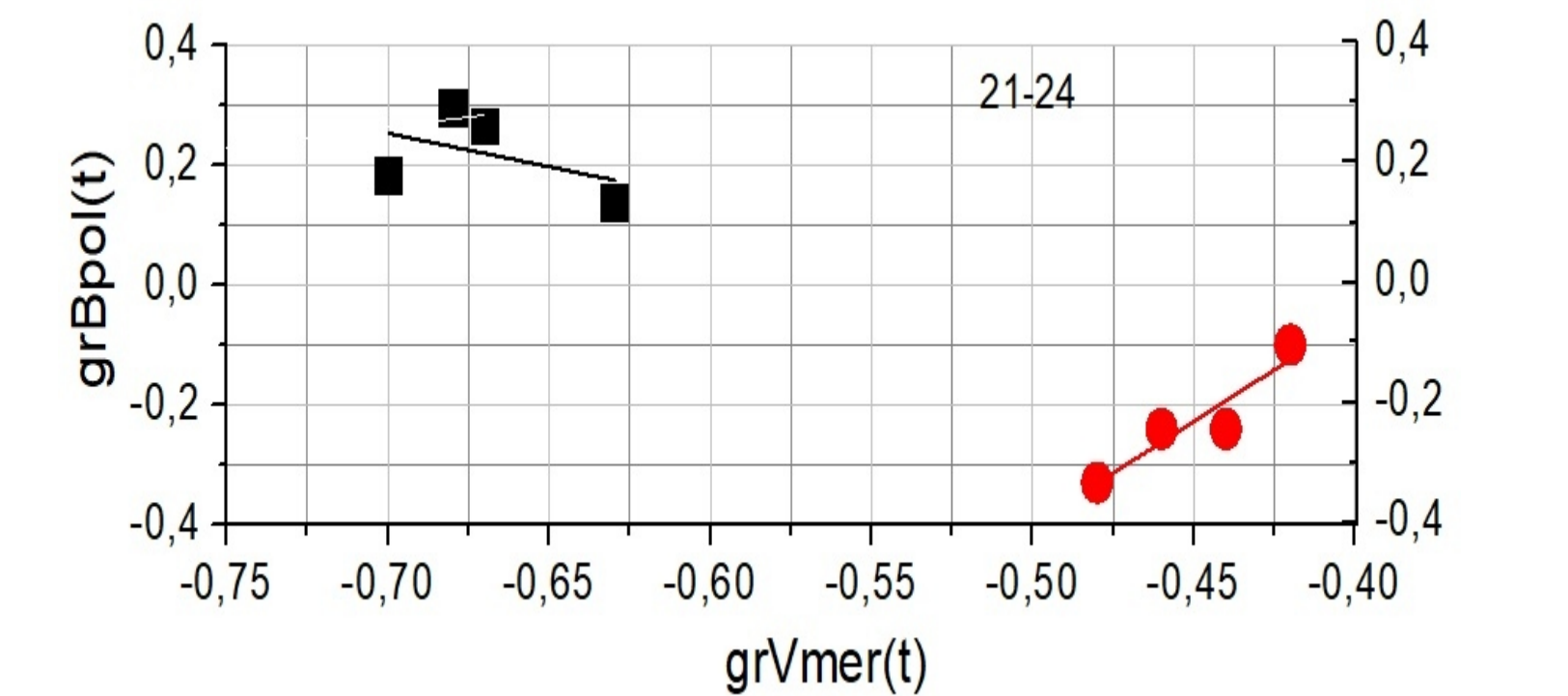
- Рис.4 Взаимная динамика градиента  $grV_{mer}(t)$  и градиента  $grB_{tor}(t)$  для фазы роста и спада активности. Размерность  $grB_{tor} - G/c/год$ , размерность  $grV_{mer} - m/s^2/год$ . Красным отмечены данные для фазы роста активности.

- На рис.5 представлена взаимная динамика градиента меридиональной скорости  $grV_{mer}(m/s^2/год)$  и градиента полярного поля  $grB_{pol}(G/c/год)$ . Для фазы роста активности реализуется положительная корреляция (коэффициент корреляции  $b=3.45$ ) для градиента полярного поля  $grB_{pol}$  и градиента меридиональной скорости  $grV_{mer}$  (оба градиента отрицательные).

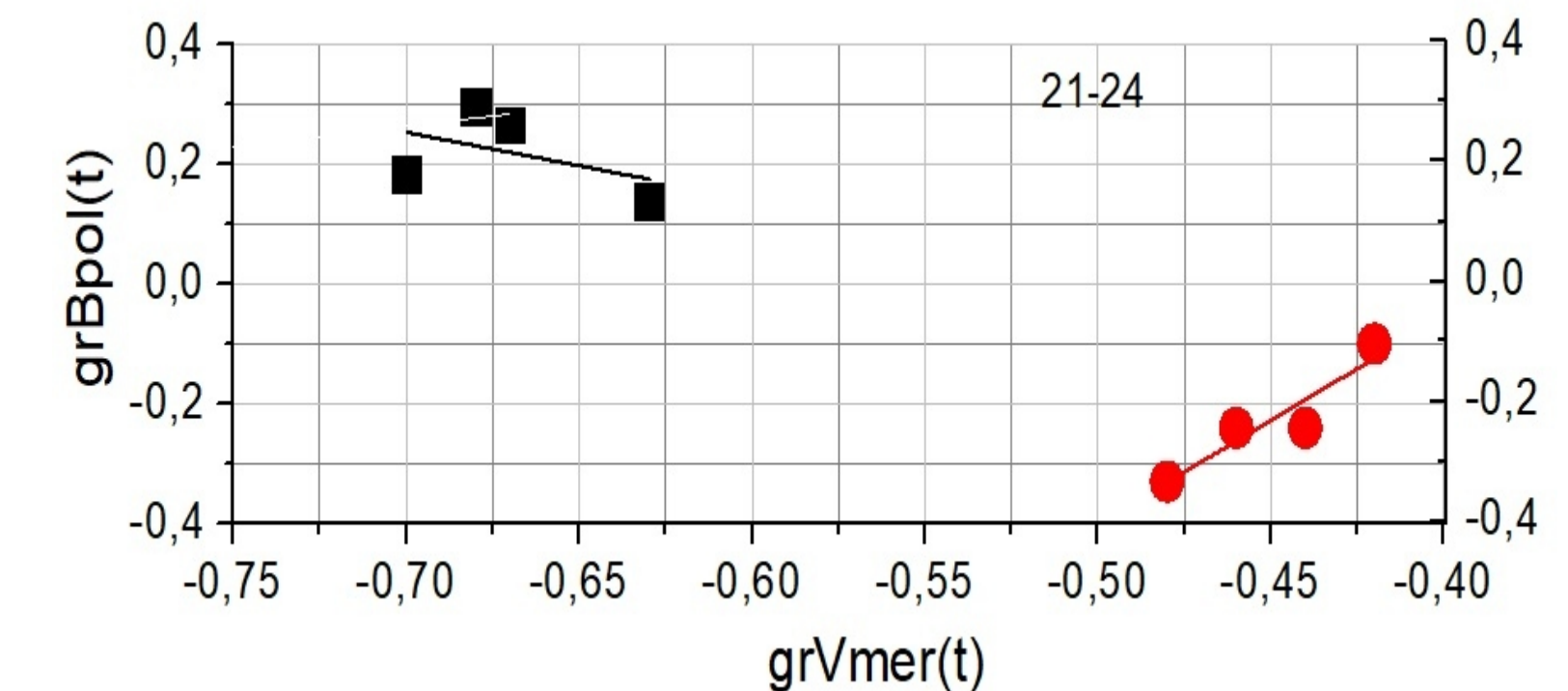


- Рис.9 а. Взаимная динамика градиента меридиональной скорости  $grV_{mer}(m/s^2/год)$  и длительности фазы роста (красные значки) и спада активности (1); взаимная динамика градиента широты  $grQ(град/год)$  и длительности фазы роста и спада активности (2). б. взаимная динамика периода цикла и суммы градиентов меридиональной скорости  $grV_{mer}$  (красные значки) для фазы роста и спада активности и суммы градиентов широты  $grQ$  тороидального поля (или солнечных пятен) для фазы роста и спада.

- Уменьшение отрицательного  $grV_{mer}$  значительно ускоряет процесс распада полярного поля, отрицательный  $grB_{pol}$  уменьшается. Отметим, что при этом увеличивается положительный градиент  $grB_{tor}$  (рис.4). Для фазы спада активности реализуется отрицательная корреляция ( $b=-0.68$ ) градиента  $V_{mer}$  ( $grV_{mer}<0$ ) и градиента полярного поля  $grB_{pol}$  ( $grB_{pol}>0$ ). Увеличение отрицательного  $grV_{mer}$  ускоряет процесс формирования нового полярного поля. Рост  $B_{pol}$  происходит быстрее. Отметим, что при этом увеличивается отрицательный градиент  $grB_{tor}$  (рис.4).



- Рис.5 Взаимная динамика градиента  $grV_{mer}(m/s^2/год)$  и градиента полярного поля  $grB_{pol}(G/c/год)$ .



- Рис.6 Взаимная динамика градиентов  $grB_{pol}$  и  $grB_{tor}$  для фазы спада и роста активности.

- На рис.6 представлена взаимная динамика градиентов полярного и тороидального магнитных полей  $grB_{pol}$  и  $grB_{tor}$  для фазы спада и роста активности. Временные градиенты  $grB_{tor}(t)$  и  $grB_{pol}(t)$  имеют разные знаки: для фазы роста активности это — плюс/минус, для фазы спада активности это — минус/плюс.

- Рассмотренные корреляционные связи показывают чрезвычайно важную и, возможно, основную роль динамики магнитных структур солнечных пятен в процессе формирования основных параметров солнечных циклов (длительность циклов, динамика числа SSN). Определенный тип связи между скоростью магнитных структур, образованием меридионального тороидального магнитного поля и дифференциальным вращением Солнца формирует цикличность солнечной активности.

#### Литература

1. Observationally Guided Models for the Solar Dynamo and the Role of the Surface Field/Robert H. Cameron, Manfred Schüssler/ Space Science Reviews (2023) 219:60, <https://doi.org/10.1007/s11214-023-01004-7>
  2. Solar Polar Fields During Cycles 21 – 23: Correlation with Meridional Flows/ P. Janardhan · Susanta K. Bisoi · S. Gosain/ /Solar Phys (2010) 267: 267–277 DOI 10.1007/s11207-010-965 (ftp://nsokp.nso.edu/kpvt/synoptic/mag/).
  3. VARIATIONS IN THE AXISYMMETRIC TRANSPORT OF MAGNETIC ELEMENTS ON THE SUN: 1996–2010/David H. Hathaway and Lisa Rigmire/ The Astrophysical Journal, 729:80 (9pp), 2011 March 10, doi:10.1088/0004-637X/729/2/80
- Морозова Евгения Ивановна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т.(495)333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru. (ИКИ РАН).
  - Анатолий Алексеевич Петрукович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН, т.(495)333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.
  - Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т.(495)333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru (ИКИ РАН).

Дополнительные материалы по теме данного доклада будут представлены на сайте <http://d54x.ru>

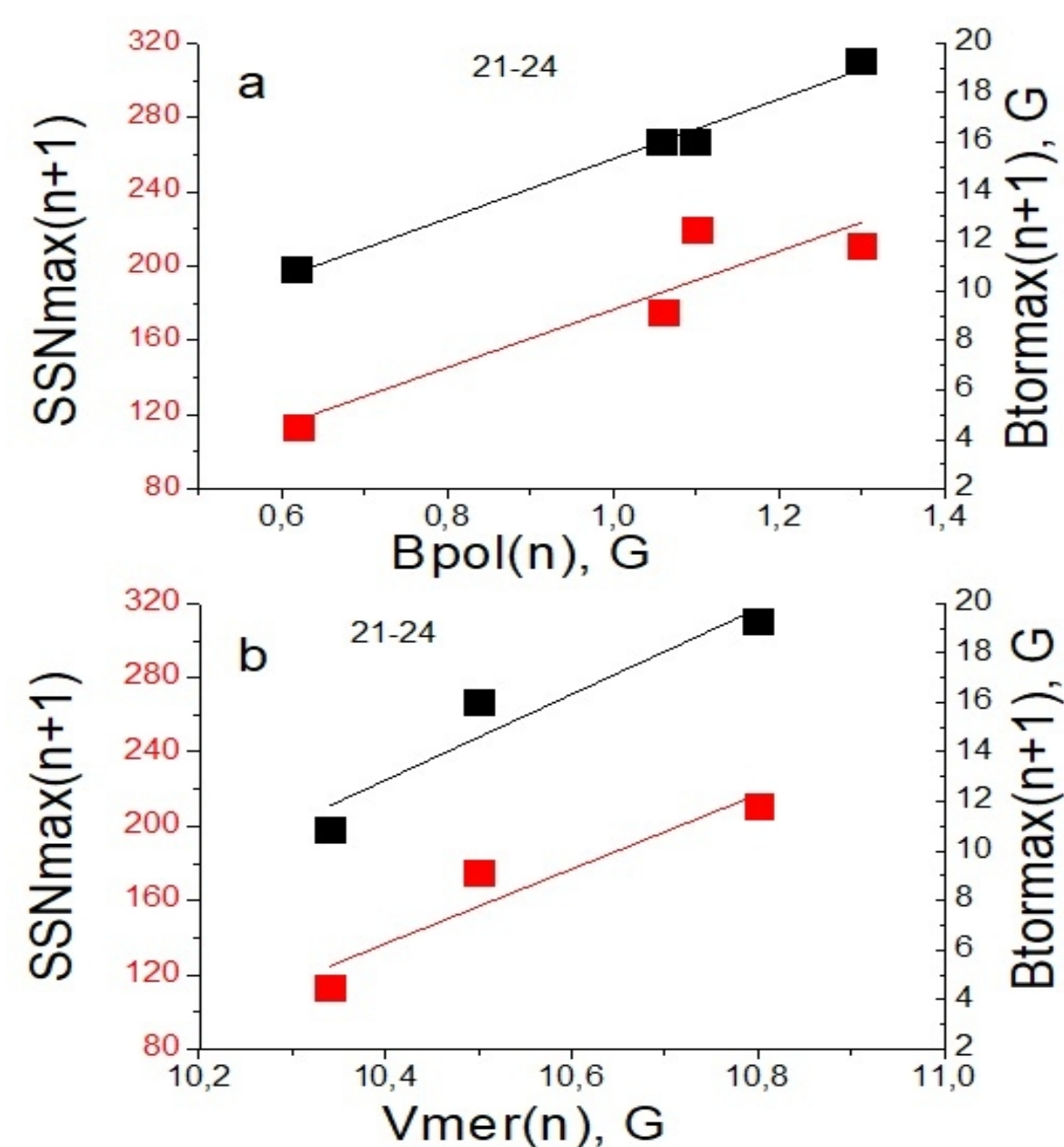


Рис.7. Связь между максимумом следующего цикла  $SSN_{max}(n+1)$  (красные значки) и тороидального поля  $B_{tor_{max}}(n+1)$  в  $n+1$  цикле и с динамикой (а) - полярного поля  $B_{pol}(n)$  и (б) с динамикой меридиональной скорости  $V_{mer}(n)$  в предыдущем цикле.