

Малинин В.Н., Вайновский П.А. Гордеева С.М.

**Взаимосвязь компонентов тепло- и
влагообмена во внутритропической зоне
конвергенции по данным спутникового архива
Reanalysis-2**

Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург



21 международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
13 - 17 ноября 2023 г. Москва



ВЗК – локомотив изменений климата

ВЗК является важнейшей составной частью прямой циркуляционной ячейки Хэдли (30° с.ш. — 30° ю.ш.), которая в низких широтах полностью определяет закономерности и изменчивость процессов взаимодействия океана и атмосферы.

В пределах ВЗК наблюдается существенное усиление количества осадков: там выпадает 32 % глобального количества осадков, которое **выделяет огромное количество тепла**, расходуемое на поддержание атмосферной циркуляции.

Кроме того, в пределах ВЗК отмечается **интенсификация многих гидрометеорологических процессов**, причины которых недостаточно известны

В ВЗК отмечается **максимальный парниковый эффект**, определяющий короткопериодные колебания климата, доминирующим фактором формирования которого служит **атмосферный водяной пар**.

Важными элементами ВЗК являются **ЭНЮК и Атлантический Ниньо**, которые оказывают воздействие на погоду и климат чуть ли не в глобальном масштабе.

Цель данного доклада - выявление взаимосвязей межгодовой изменчивости параметров тепло- и влагообмена друг с другом в отдельных океанах и ВЗК в целом, а также с индексами парникового эффекта (ПЭ).

ВЗК и парниковый эффект

На экваторе коротковолновые и длинноволновые потоки радиации достигают максимальных значений. Естественно, ПЭ здесь максимален.

Для количественной оценки (ПЭ) могут быть использованы различные **радиационные индексы**:

* ***G_a*** - ***atmosphere greenhouse effect parameter***, представляет разность между собственным длинноволновым излучением подстилающей поверхности и на верхней границе атмосферы (*Raval, Ramanathan, 1989*)

* ***G_s*** - ***surface greenhouse effect parameter***, означает противои兹лучение атмосферы (встречное излучение) (*Boer, 1993*).

G_a характеризует величину ПЭ **всей атмосферы**, а ***G_s*** – **у подстилающей поверхности**.

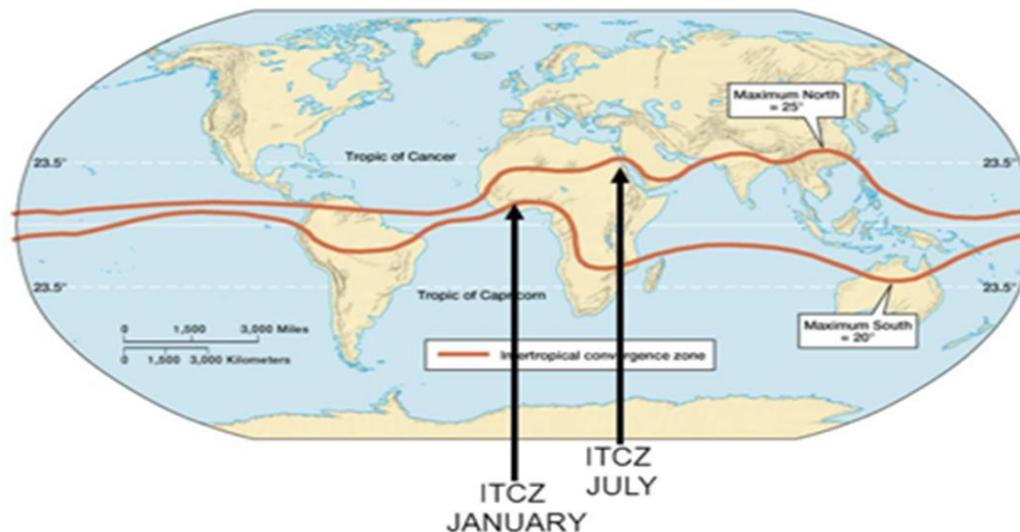
Многие закономерности пространственно-временной изменчивости индексов *G_a* и *G_s* в ВЗК практически не известны.

В работе использованы среднемесячные значения характеристик длинноволнового радиационного баланса, влагообмена между океаном и атмосферой, а также температуры атмосферы (ТА) и температуры поверхности океана (ТПО) для водной поверхности за 40-летний период (1979–2018 гг.) для области ВЗК (10° с.ш.– 10° ю.ш.) выбранные из архива Reanalysis-2

Расположение внутритропической зоны конвергенции зимой (в январе) и летом (в июле).

В данной работе в качестве границ ВЗК принята зона 10° с.ш. — 10° ю.ш. Среднемноголетнее положение оси ВЗК находится примерно на 6° с.ш.

По мере потепления климата происходит сужение ВЗК и усиление конвекции в ядре ВЗК, но при этом сильно ослабляется конвекция на экваториальных краях ВЗК.

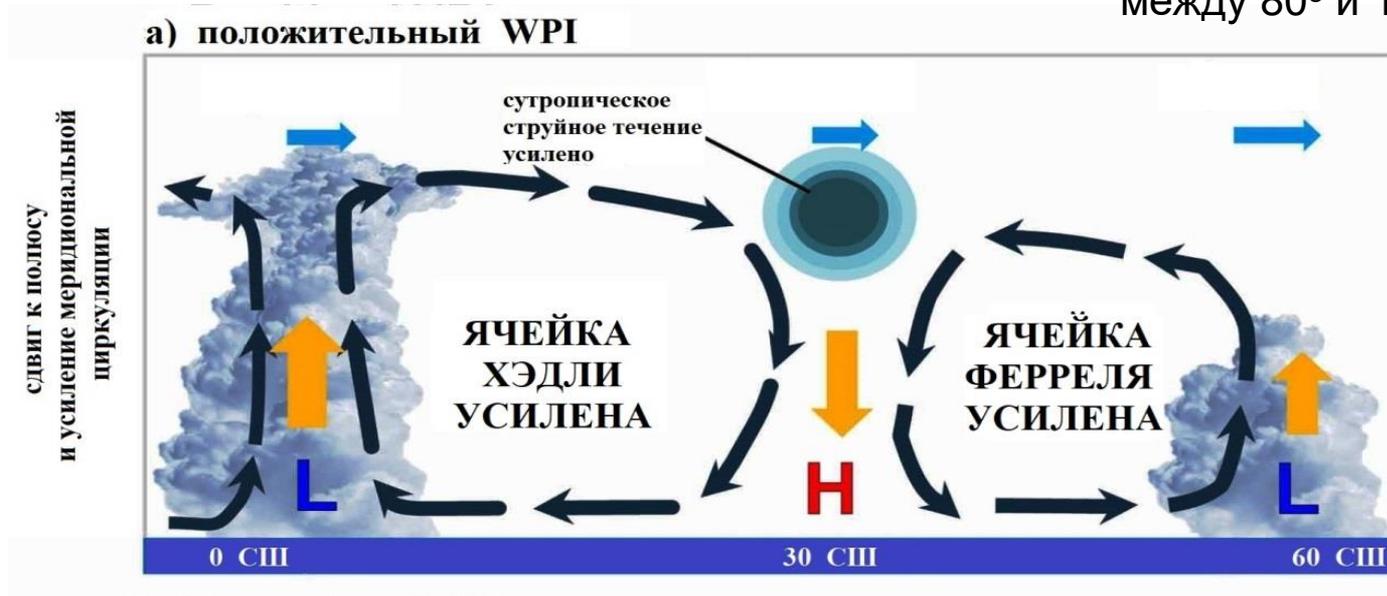


Огромное влияние ВЗК на атмосферу проявляется в формировании парникового эффекта, так как здесь коротковолновые и длинноволновые потоки радиации достигают максимальных значений

Схема меридиональной циркуляции атмосферы в летний период северного полушария, связанная с индексом интенсивности ВЗК

(warm pool index ITCZ, WPI) (Basconcillo et al., 2021)

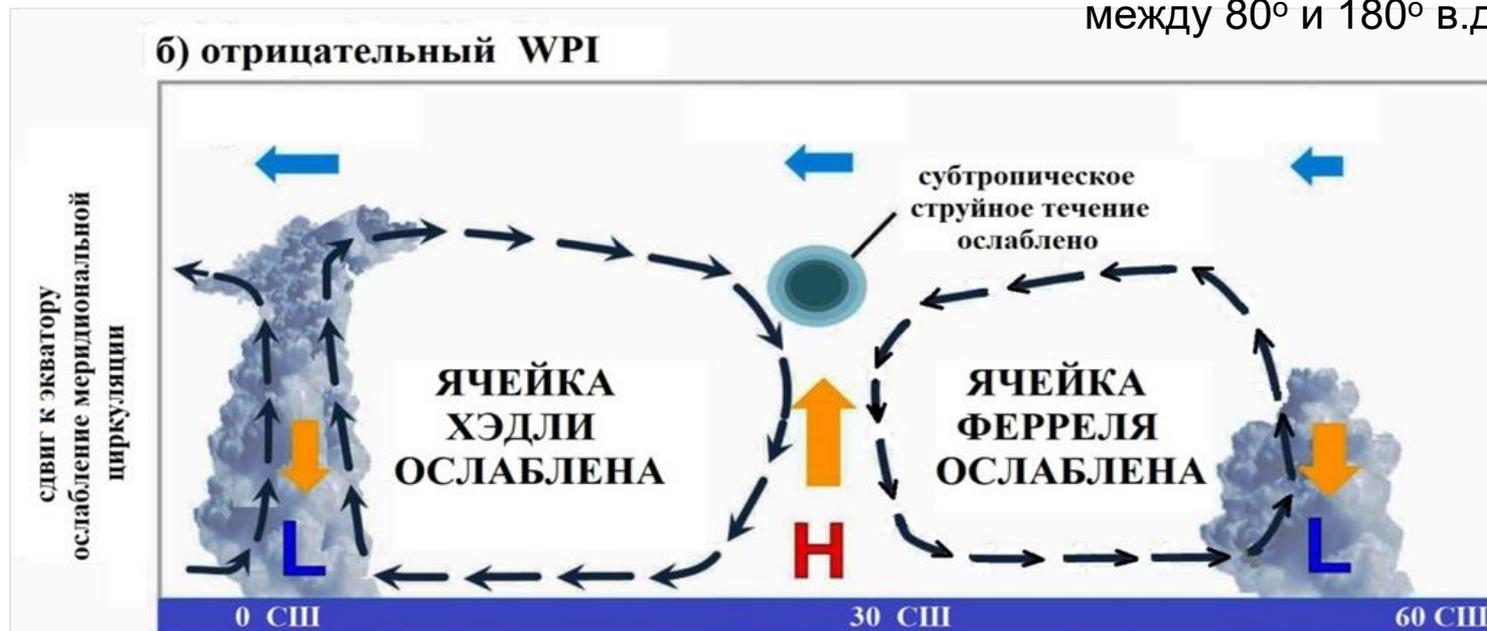
WPI - среднее количество осадков в пределах ВЗК в Индо-Тихоокеанском бассейне между 80° и 180° в.д.



При **положительной** фазе WPI происходит интенсификация ячейки Хэдли: усиление конвекции, выпадение больше нормы осадков, усиление субтропического струйного потока, смещение к северу границы ячейки Хэдли, более интенсивное опускание сухого воздуха в тропиках. В свою очередь это вызывает интенсификацию ячейки Ферреля.

Схема меридиональной циркуляции атмосферы в летний период северного полушария, связанная с индексом интенсивности ВЗК

WPI - среднее количество осадков в пределах ВЗК в Индо-Тихоокеанском бассейне между 80° и 180° в.д.



При **отрицательной** фазе индекса WPI и ослаблении ячейки Хэдли отмечается обратная ситуация, т.е. ослабление конвекции и выпадение меньше нормы величины осадков.

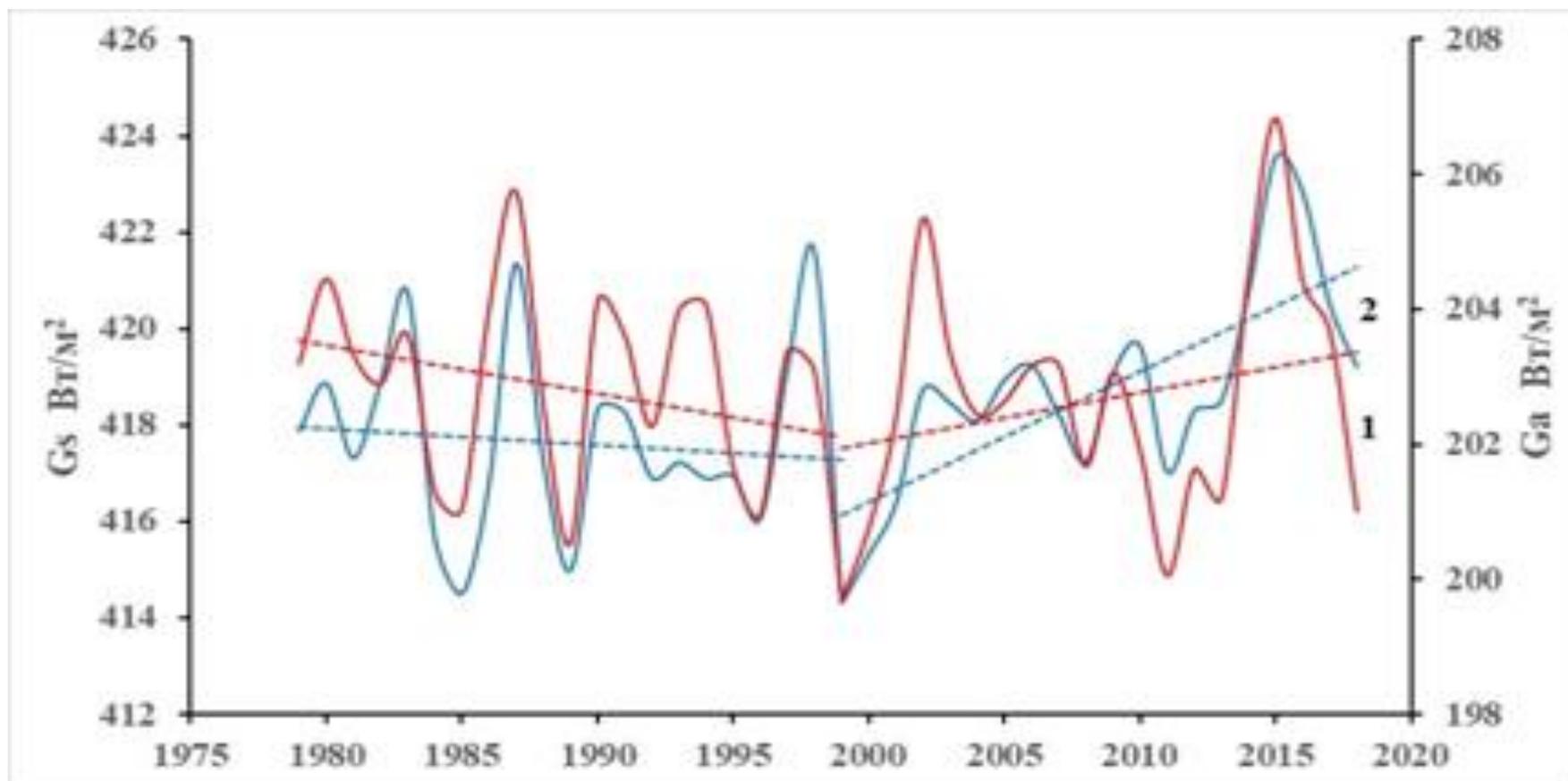
Принимая во внимание огромное количество тепла, выделяемое в атмосферу при образовании осадков, можно уверенно утверждать, что именно **осадки в ВЗК служат «мотором» меридиональной циркуляции.**

Статистические характеристики среднегодовых зонально-осредненных (10° с.ш. – 10° ю.ш.) индексов [Ga] и [Gs] для ВЗК в целом и отдельных океанов за период 1979–2018 гг.

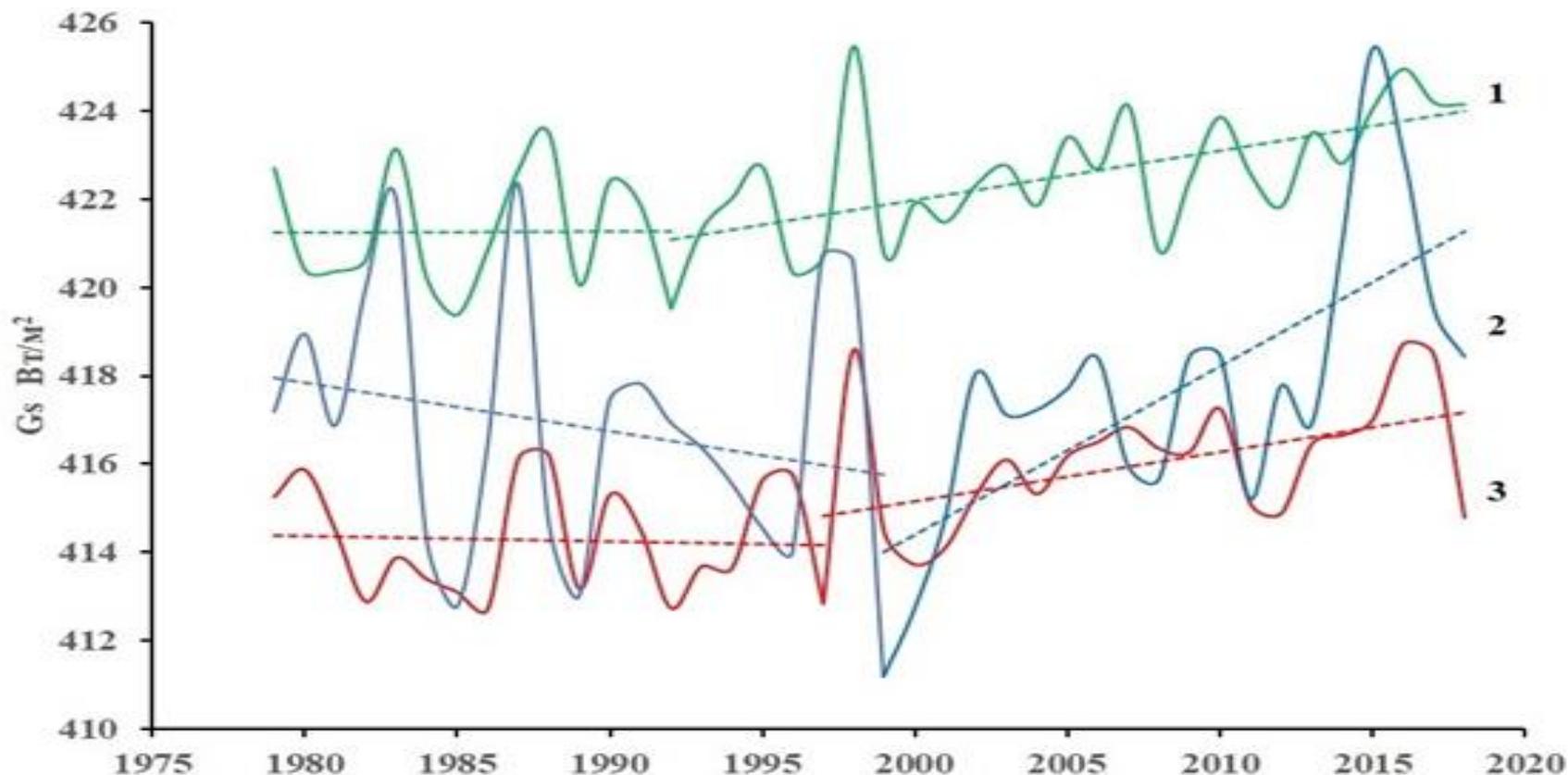
ПЭ в ВЗК отличается очень высокой пространственно-временной однородностью в отличие от характеристик тепло и влагообмена между океаном и атмосферой. Корреляция между индексами для ВЗК составляет $r = 0,70$. Для отдельных океанов она слабее.

Индекс	Стат. характеристики	АО	ИО	ТО	ВЗК
[Ga]	Среднее, Вт/м ²	197,4	211,1	200,3	202,8
	Коэффициент вариации	0,013	0,010	0,018	0,011
	Коэф-т линейного. тренда, a_1 , Вт/(м ² год)	-0,054	0,032	-0,023	-0,007
	Коэф-т детерминации линейного тренда, R^2	0,060	0,031	0,006	0,003
[Gs]	Среднее, Вт/м ²	415,2	422,1	417,4	418,3
	Коэффициент вариации	0,004	0,004	0,007	0,005
	Коэф-т линейного. тренда, a_1 , Вт/(м ² год)	0,081	0,057	0,063	0,070
	Коэф-т детерминации линейного тренда, R^2	0,33	0,38	0,06	0,15

Межгодовой ход зонально-осредненных индексов $[Ga]$ (1) и $[Gs]$ (2) в океанической области ВЗК (10° с.ш. – 10° ю.ш.), в $Вт/м^2$



Межгодовой ход осредненных по области 10° с.ш. — 10° ю.ш. годовых значений индекса G_s (в Вт/м²) для Индийского (1), Тихого (2) и Атлантического (3) океанов
(Штриховые линии – локальные тренды)



Индекс радиационного воздействия ($I_{РВ}$)

$$I_{РВ} = F_{\text{кон}} - F_{\text{нач}} = \alpha_1 \times n \quad (1)$$

где $F_{\text{кон}}$, $F_{\text{нач}}$ – радиационное воздействие в конце и начале периода, α_1 – коэффициент тренда, n – длина временного ряда.

Максимальный $I_{РВ}$ отмечается в АО ($I_{РВ} = 3,24$ Вт/м²), а наименьший – в ИО ($I_{РВ} = 2,28$ Вт/м²).

По смыслу оценки $I_{РВ}$ соответствуют оценкам радиационного форсинга (РФ), определяемым с помощью сложных гидродинамических моделей, которые позволяют рассчитать концентрации парниковых газов в атмосфере.

Поскольку значения РФ характеризуют разность потоков коротковолнового и длинноволнового излучения на уровне тропопаузы – границы раздела тропосферы и стратосферы земной атмосферы, то сравнить их с полученными оценками $I_{РВ}$ по формуле (1) не представляется возможным.

Однако несомненно, что оценки $I_{РВ}$ свидетельствуют о значительном нагреве поверхностного слоя океана в пределах ВЗК за счет ПЭ и следовательно, усилении процесса атмосферной конвекции и роста осадков.

Оценки индекса тренда ($I_{тр}$) и коэффициентов корреляции индекса G_s с характеристиками тепло- и влагообмена ($r_{(G_s, X)}$) в зонах 0–10° с.ш. и 0–10° ю.ш. в Атлантическом океане.

Индекс тренда = $I_{тр} = 100 a_1 n / X_{ср}$

Параметр	Зона	Осадки	Испарение	G_s	T_a	ТПО	ВА
$I_{тр}$	0–10° с.ш.	26,6	1,14	0,130	2,13	1,93	4,27
	0–10° ю.ш.	-8,7	5,79	0,032	1,73	1,69	-1,41
$r_{(G_s, X)}$	0–10° с.ш.	0,66	0,12	-----	0,84	0,79	0,88
	0–10° ю.ш.	0,27	0,50	-----	0,69	0,72	0,69

Огромный тренд в осадках севернее экватора в значительной степени обусловлен сильным трендом в испарении южнее экватора, которое почти полностью переносится через экватор.

3-кратное повышение тренда ВА в зоне 0–10° с.ш. над зоной 0–10° ю.ш. объясняет аналогичный рост тренда G_s севернее экватора.

Тренд в ВА севернее экватора более чем в 2 раза превышает тренд в T_a и ТПО. Корреляция ВА с G_s выше, чем между T_a и G_s .

Коэффициенты корреляции индекса G_s с характеристиками тепло- и влагообмена в системе океан-атмосфера и их друг с другом в зонах ВЗК

Зона	Корреляция	АО	ИО	ТО	ВЗК
0–10° с.ш.	$r_{(G_s, TA)}$	0,84	0,63	0,88	0,84
	$r_{(G_s, BA)}$	0,88	0,80	0,82	0,84
	$r_{(BA, TA)}$	0,61	0,26	0,72	0,78
	$r_{(BA, P-E)}$	0,62	0,77	0,78	0,65
	$r_{(P, P-E)}$	0,98	0,93	0,98	0,96
0–10° ю.ш.	$r_{(G_s, TA)}$	0,70	0,65	0,90	0,82
	$r_{(G_s, BA)}$	0,67	0,74	0,87	0,84
	$r_{(BA, TA)}$	0,32	0,19	0,79	0,75
	$r_{(BA, P-E)}$	0,66	0,76	0,79	0,92
	$r_{(P, P-E)}$	0,96	0,95	0,95	0,92

Эксперты МГЭИК указывают, что «увеличение концентрации водяного пара является ключевым *следствием, но не причиной* процесса глобального потепления и, следовательно, **полностью** обусловлено положительной обратной связью между ними». Если «полностью» - значит, связь между ТА и ВА должна быть близкой к функциональной. В этом случае игнорируется влияние влагообмена между океаном и атмосферой на «увеличение концентрации водяного пара».

Из таблицы видно, что **корреляция между ВА и P-E во всех океанах превышает «положительную обратную связь» (корреляцию) между ВА и ТА.**

Поэтому связь между ТА и ВА не может быть функциональной в принципе.

Регрессионные модели осадков с определяющими факторами

стандартизированная модель осадков для зоны севернее экватора

$$Z_{[P]сэ} = 0,51 Z_{[Ga]сэ} + 0,54 Z_{[E]юэ}. \quad (2)$$

где сэ – зона 0-10 с.ш. ВЗК, юэ – зона 0-10 ю.ш. ВЗК.

$R^2 = 0,87$, а стандартная ошибка модели в долях СКО составляет $\xi = 0,32$.

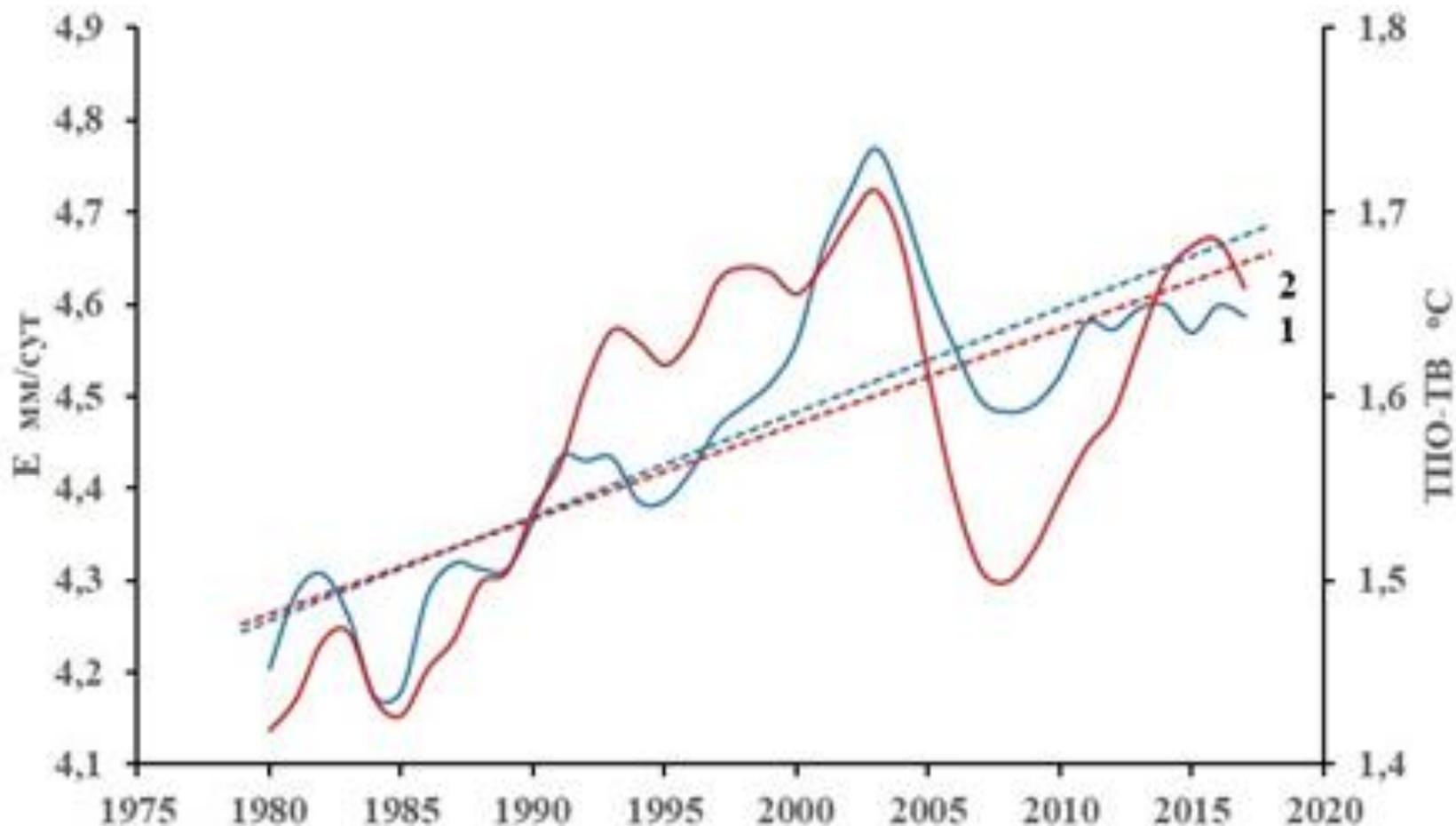
Влияние индекса $[Ga]_{сэ}$ на осадки проявляется через конвекцию в толще тропосферы, а испарение – путем переноса влаги через экватор.

Параметры $[Ga]_{сэ}$ и $[E]_{юэ}$ практически одинаково влияют на изменчивость осадков, их вклад в R^2 составляют 0,44 и 0,43.

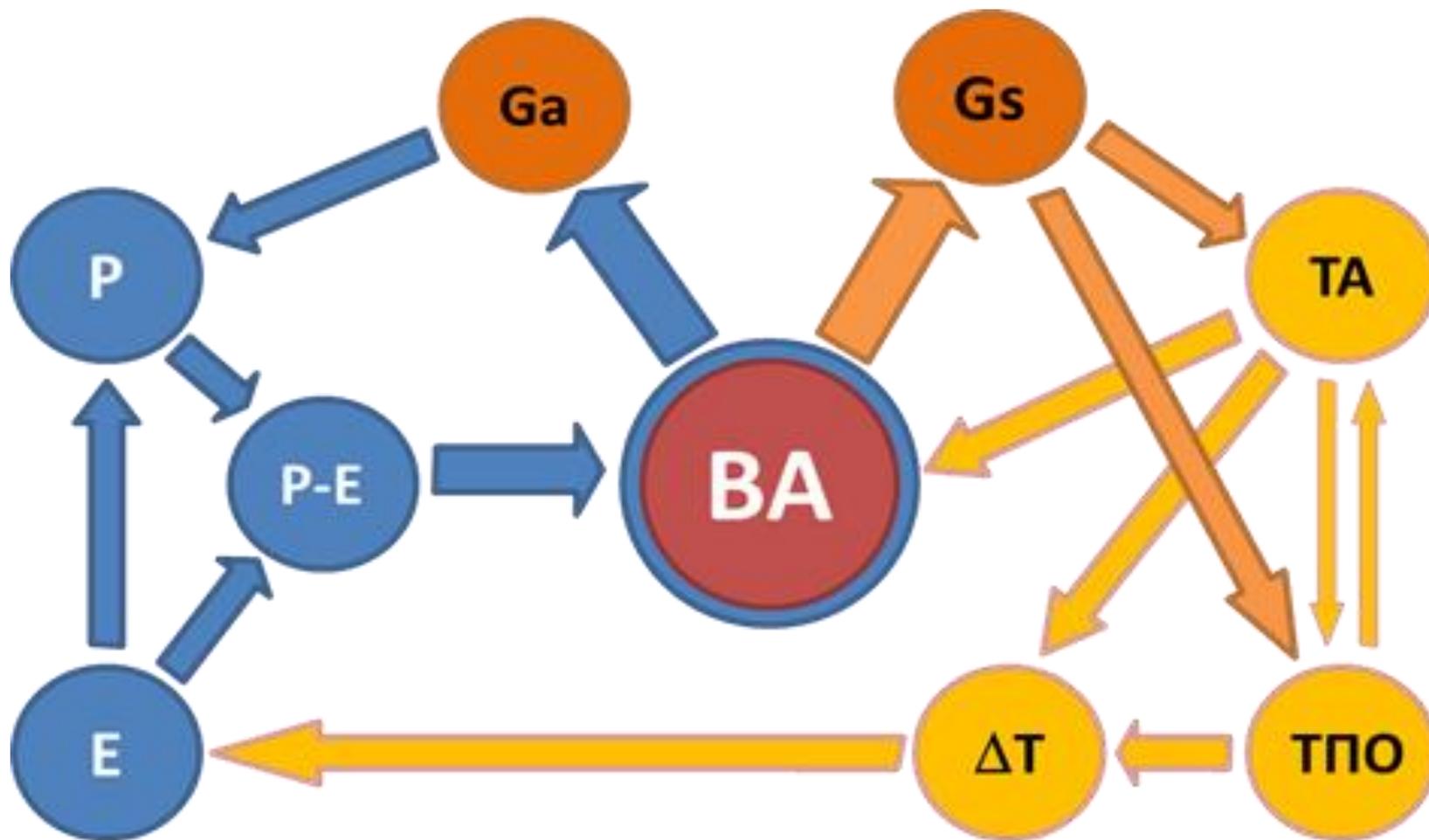
Для зоны южнее экватора (0-10 ю.ш.) получено уравнение с теми же предикторами ($[Ga]_{юэ}$, $[E]_{юэ}$), однако точность его заметно меньше ($R^2 = 0,69$).

Межгодовая изменчивость ПЭ в тропосфере и испарение в зоне 0–10° ю.ш. оказывают доминирующее влияние на изменчивость осадков в ВЗК.

Межгодовой ход 3-летних скользящих средних годовых значений испарения (1) и вертикального перепада температуры в приводном слое (2) в области ВЗК ($r=0,83$)



Концептуальная схема взаимосвязи межгодовых колебаний гидрометеорологических параметров в ВЗК



Все стрелки основаны на высокой ($r=0,78—0,98$) корреляции между этими параметрами.

Описание концептуальной схемы взаимосвязи гидрометеорологических параметров в ВЗК

Центральный элемент в этой схеме — **ВА**, которое является важным климатообразующим фактором, причем оно одновременно влияет на формирование изменчивости G_a , на тренд и изменчивость G_s .

Левый блок: В результате повышения (понижения) ВА происходит усиление (ослабление) индекса G_a . В результате повышается (понижается) температура тропосферы, усиливается (ослабляется) конвекция и как следствие возрастает (уменьшается) количество выпадающих осадков. Мощный тренд в осадках может вызываться только под влиянием испарения. В его формировании принимают участие обе широтные зоны, причем зона южной экватора является определяющей. Доминирующее влияние на изменчивость разности $P—E$ оказывают осадки. Поэтому тренд и изменчивость $P—E$ в значительной степени влияют на формирование тренда и изменчивости ВА.

Правый блок: Влияние ВА на индекс G_s является доминирующим. В результате ПЭ повышается температура воздуха и воды поверхностного слоя океана. Вследствие положительной обратной связи происходит определенное влияние ТА на ВА, которое затем через ПЭ воздействует обратно на ТА.

Концептуальная схема взаимосвязи межгодовых колебаний гидрометеорологических параметров в ВЗК

Выводы

Итак, **ТА** и **Р—Е** примерно одинаково влияют на изменчивость **ВА**. Однако тренд в **ВА** формируется исключительно за счет процессов влагообмена, так как тренды в **Р** и **Е** в разы превышают тренд в **ТА**. Отметим также, что тренд и межгодовая изменчивость испарения по существу контролируются вертикальным градиентом температуры ΔT .

Особого внимания в схеме на рисунке заслуживают осадки в зоне ВЗК **севернее экватора**. Здесь они имеют максимальные значения, максимальные положительные тренды, а с учетом огромного количества тепла, выделяемого в атмосферу при конденсации водяного пара, именно **осадки определяют интенсивность восходящей ветви ячейки Хэдли**.

Если ВЗК является локомотивом современных изменений климата, то осадки служат «топливом» меридиональной циркуляции атмосферы, причем их влияние не ограничивается ячейкой Хэдли, а распространяется и на ячейку Ферреля.

При этом доминирующее влияние на осадки оказывают всего два параметра: ПЭ в тропосфере, определяемый по индексу G_a , и испарение в зоне $0-10^\circ$ ю.ш., которые описывают **87 %** дисперсии межгодовой изменчивости осадков в главной зоне ВЗК – севернее экватора и **69 %** в зоне южнее экватора.

1720

1900

1950

1970

1980

1990

2006



Спасибо!

Теперь можно расслабиться.....

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ