



Влияние глобального изменения климата на питание и ресурсы подземных вод

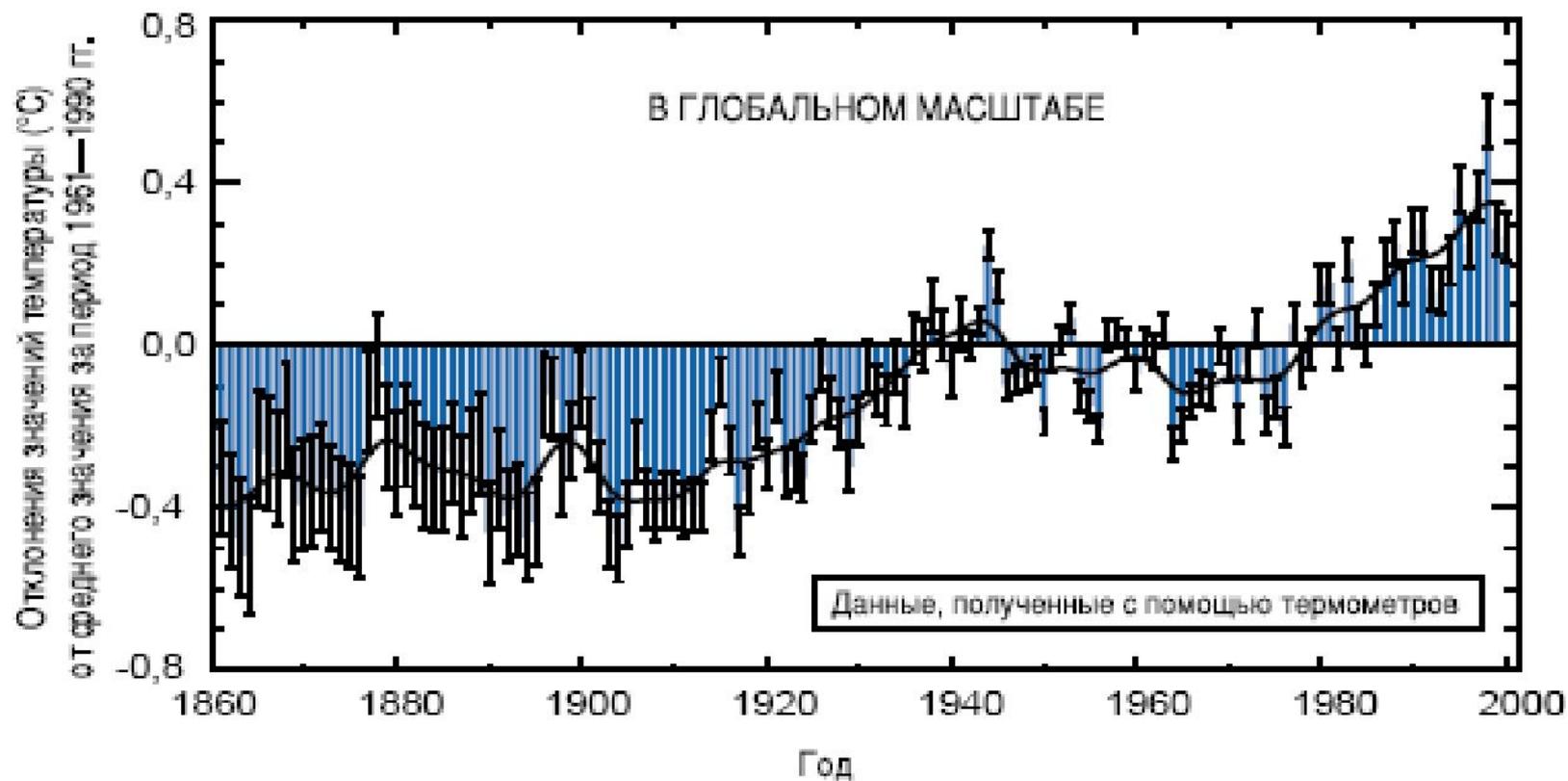
С.П. Поздняков

26 марта 2012

Содержание

- Почему меняется климат
- Прогнозы изменения климата – последние результаты
- Используемая модель для оценки влияния изменения климата на питание
- Результаты моделирования на примере бассейна р. Жиздры (в пределах Калужской области)
- Выводы

результаты наблюдений
(по данным: IPCC Fourth Assessment Report, 2007
Изменение климата,
Обобщенный доклад,
доклад 2007 г.



Радиационный баланс

- Средняя глобальная приповерхностная температура T зависит от баланса поступающих потоков тепла Q_{in} и уходящих потоков Q_{out}
- Поток Q_{in} состоит из падающего на Землю потока тепла от солнца (и эндогенного потока
- Поток Q_{out} это переизлучение поглощённой солнечной энергии в космическое пространство

$$C_{ef} \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

Радиационный баланс и катастрофические извержения вулканов

- В случае, если входящие и выходящие потоки сбалансированы, глобальная температура остается постоянной
- При изменении соотношения потоков меняется средняя температура
- Каждое извержение вулканов приводит к **выбросу в атмосферу аэрозольных частиц**, которые поднимаются в стратосферу, уменьшая ее прозрачность для солнечной радиации, уменьшая тем самым поток тепла, приходящий в приземную атмосферу
- Наблюдения показывают, что этот эффект заметен в течении года или немногим более

Радиационный баланс и ядерная зима,

- в 80-х годах прошлого века в СССР и США открыт при помощи компьютерного моделирования эффект **ядерной зимы**
- Этот эффект показывает, что в результате возможных широкомасштабных пожаров, могущих возникнуть при масштабном ядерном конфликте прозрачность атмосферы для входного потока солнечного тепла уменьшится, за счет чего нарушится радиационный баланс, следовательно уменьшается температура приземного воздуха
- Результаты расчетов показали, что при реалистических выбросах температура воздуха на планете может кратковременно (на год – два) понизиться, что приведет к необратимым последствиям и для человечества и для биосферы в целом

Радиационный баланс и парниковый эффект

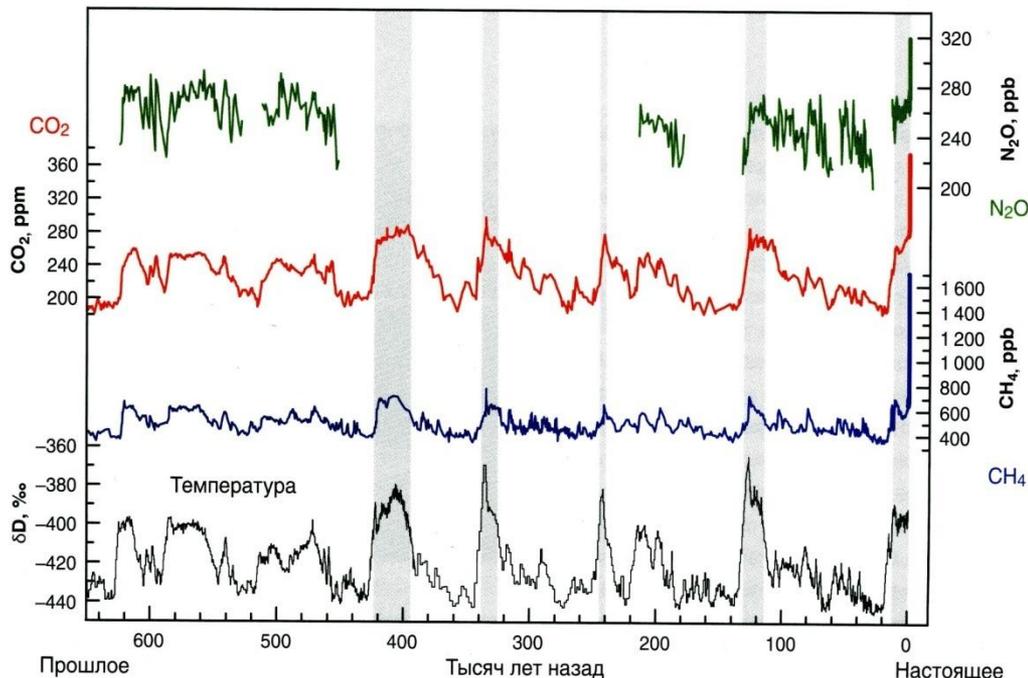
- Парниковый эффект – различная прозрачность атмосферы для входного и выходных потоков тепла
- На диапазон **длин волн 400—1500 нм** (видимый свет и ближний инфракрасный диапазон) приходится 75 % энергии солнечного излучения, большинство атмосферных газов **не поглощают в этом диапазоне**
- Нагретая поверхность планеты и атмосфера излучают в дальнем инфракрасном диапазоне: так, **75 % теплового излучения приходится на диапазон 7,8—28 мкм**
- Атмосфера, содержащая газы, поглощающие в этой области спектра (т. н. **парниковые газы**. парниковые газы — H_2O , CO_2 , CH_4) **существенно непрозрачна для такого излучения, направленного от её поверхности в космическое пространство**,
Вследствие такой непрозрачности атмосфера становится хорошим теплоизолятором

Радиационный баланс, парниковый эффект и загрязнение атмосферы

- Загрязнение атмосферы за счет выбросов в нее аэрозольных частиц от промышленности, транспорта и пр. приводит к эффекту, который называется **потускнение атмосферы** – он снижает ее прозрачность для входящего потока тепла от солнца
- Парниковый эффект – снижает ее прозрачность для потока переизлучения
- Компенсируют ли они друг друга?
- По данным IPCC:
- Потускнение – снижение доступной солнечной радиации на **0.7 Вт/кв.м**
- Рост концентраций парниковых газов уменьшает выходящий за пределы атмосферы поток переизлучения на **2.6 Вт/кв.м**

Изменение климата за последние 650 тысяч лет

Изменение температуры и концентраций парниковых газов за последние 650 тысяч лет

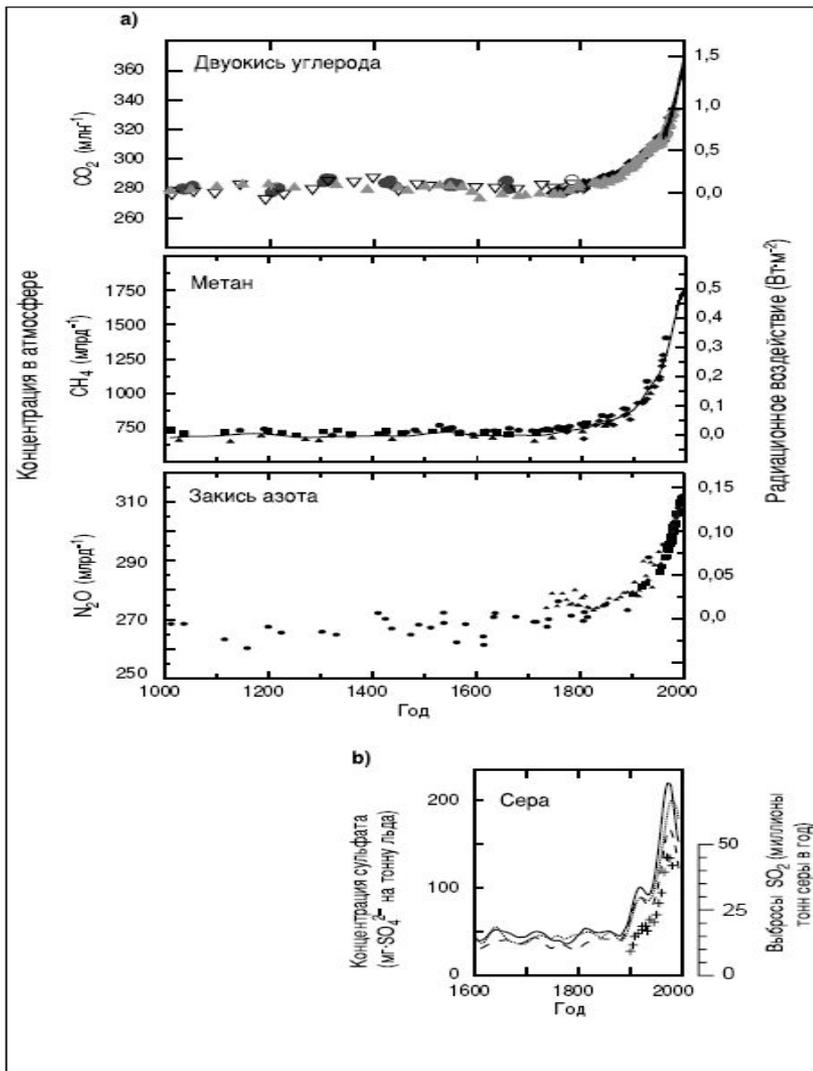


- Климат в течение тысячелетий меняется в связи с изменением потока тепла от Солнца за счет **циклов Миланковича**
- Быстрый рост температуры в последние годы не может быть объяснен этими циклами

Циклы Миланковича и климат

- Циклы Миланковича описывают периодически возникающие отклонения от средней достигающего Земли количества солнечной радиации за большой период времени в пределах от 5 до 10 процентов. Причиной этих отклонений от средней интенсивности солнечного излучения на Земле являются три эффекта:
 - *Прецессия*: поворот земной оси с периодом около 25 750 лет, в результате которого меняется сезонная амплитуда интенсивности солнечного потока на северном и южном полушариях Земли;
 - *Нутация*: долгопериодические (так называемые вековые) колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты с периодом около 41 000 лет;
 - долгопериодические колебания эксцентриситета орбиты Земли с периодом около 93 000 лет
- Рост температуры в последние годы не объясняется циклами Миланковича

Прогнозы изменения климата – последние результаты: факторы



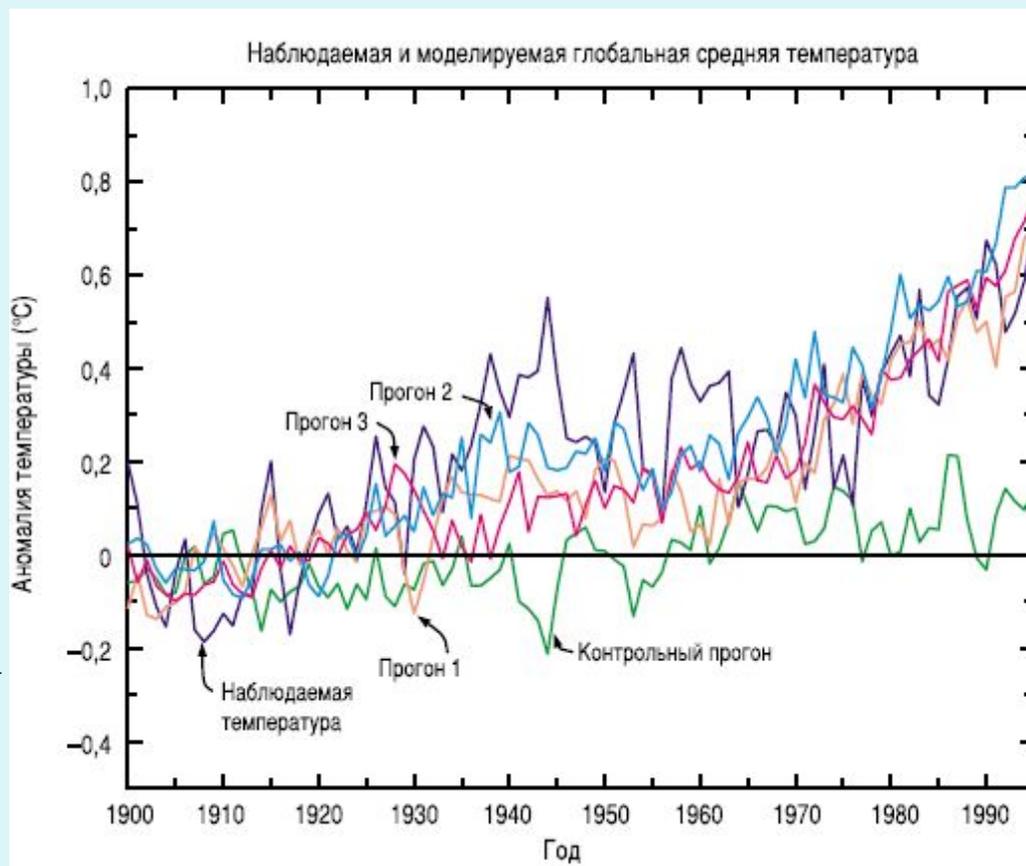
- Наиболее значимыми среди факторов являются:
 - увеличение концентраций парниковых газов аэрозолей (находящихся в воздухе микроскопических частиц и капель) в атмосфере – **парниковый эффект**
 - колебания солнечной активности – **поток солнечного тепла**
- оба фактора могут изменить радиационный баланс Земли и, соответственно, климат.
- Измерение потока солнечного тепла при помощи спутников, показывает что его **интенсивность практически не меняется** за весь период наблюдений (порядка 50 лет), составляя 1367 Вт/кв.м

ГЛОБАЛЬНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ МОДЕЛИ (ГЦМ)

- Для анализа процессов переноса тепла, влаги, воздушных масс в атмосфере, тепла и масс воды в океане используются Глобальные циркуляционные модели
- ГЦМ решает в планетарном масштабе на конечно-разностной сетке уравнения динамики атмосферы и океана, позволяя рассчитать температуру атмосферы и океана, выпадение осадков, направление ветров и течений в узлах конечно разностной сетки имеющих размер порядка 1-го градуса
- Если ввести в ГЦМ динамику прозрачности атмосферы за счет эмиссии парниковых газов, то при помощи такой модели можно сделать прогноз – как во времени будет меняться температура и интенсивность выпадения осадков в различных регионах, а также в среднем для всей Земли

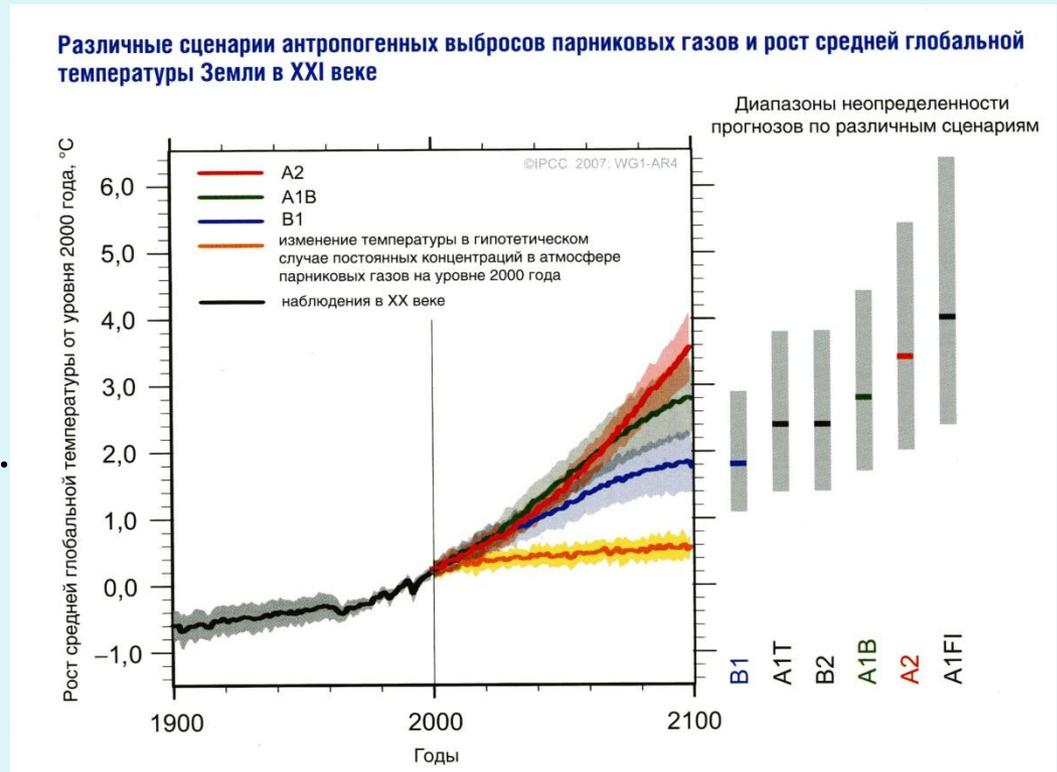
Прогнозы изменения климата – последние результаты: эпигнозное моделирование при помощи ГЦМ

- Наблюдаемые (черная кривая) и моделируемые глобальные среднегодовые аномалии температуры ($^{\circ}\text{C}$) относительно средних значений наблюдений за период с 1900 г. по 1930 г.
- Контрольное моделирование -зеленая кривая без учета парникового эффекта
- три независимых глобальных модели с использованием одного и того же фактора воздействия парникового газа плюс аэрозольные воздействия



Прогнозы изменения климата – последние результаты: прогнозное моделирование

- Результаты простой модели: историческая оценка антропогенного радиационного воздействия до 2000 г.
- с последующей оценкой радиационного воздействия для показательных сценариев.
- Серым цветом показан диапазон неопределенностей сценариев



водосбора при наиболее вероятном сценарии изменения климата для территории Московского Артезианского Бассейна

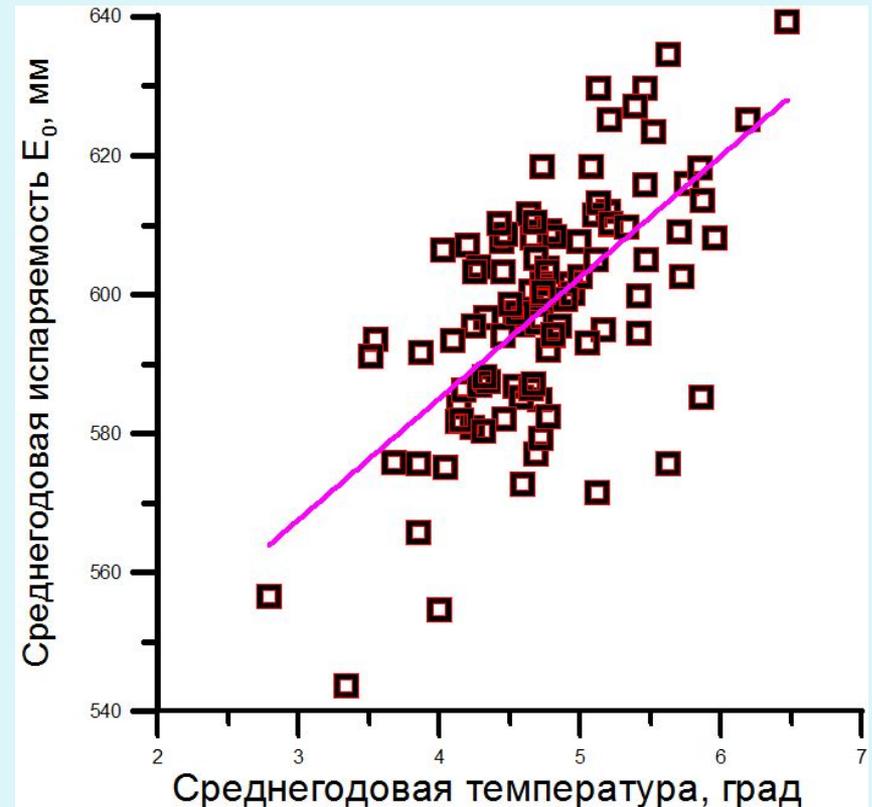
- Глобальные циркуляционные модели предсказывают, что наиболее вероятен на Европейской части России **рост температуры на примерно 4 градуса за сто лет**
- Изменение осадков пересказываются существенно хуже. По сценарию В1 предсказывается их **небольшой рост (5-15%)**
- Как изменится сток рек (поверхностный и подземный)?

Возможное изменение суммарного стока с водосбора при наиболее вероятном сценарии изменения климата для территории МАБ

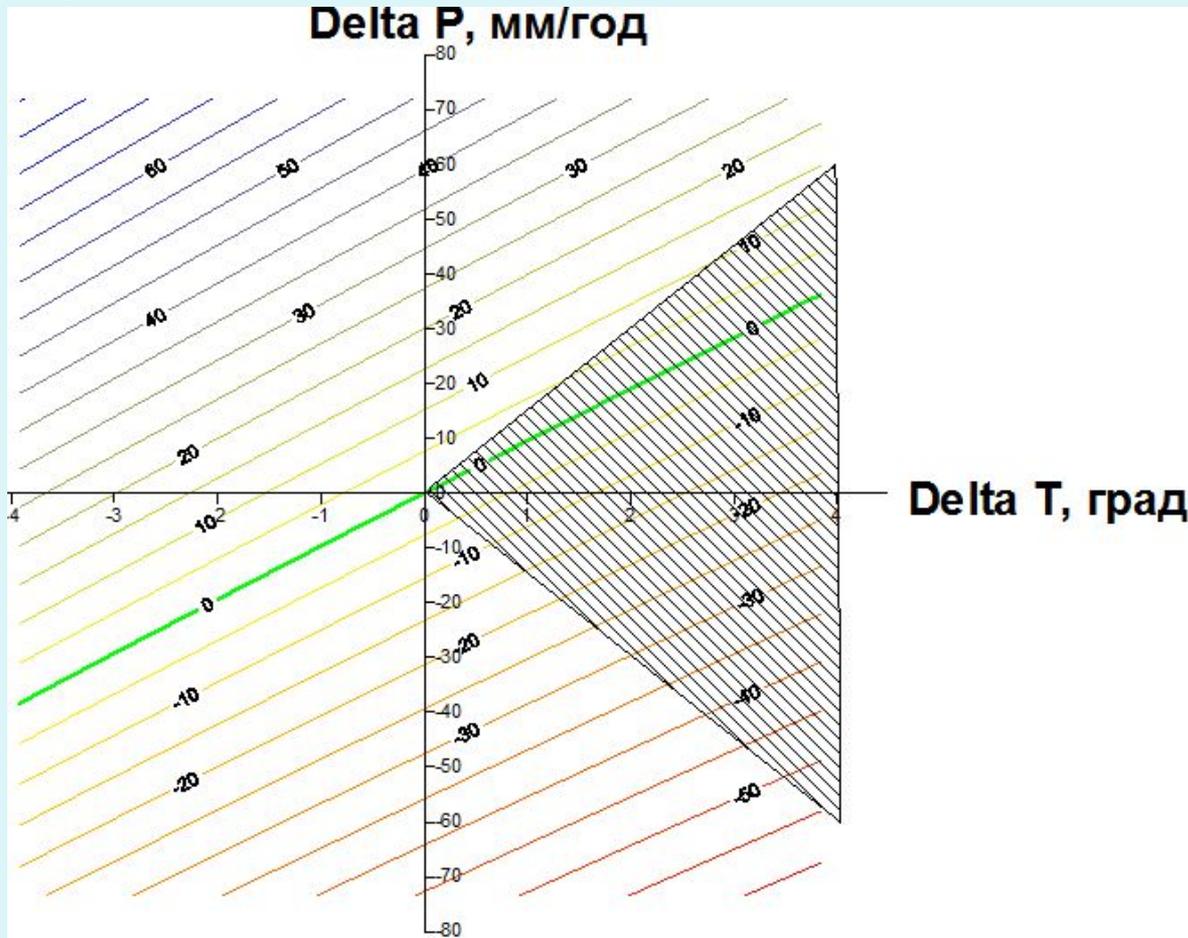
- Для оценки изменения суммарного стока при изменении средней температуры и осадков использовалась зависимость Fu:

$$\frac{E}{E_0} = 1 + \frac{P}{E_0} - \left[1 + \left(\frac{P}{E_0} \right)^w \right]^{1/w}$$

- здесь E_0 – испаряемость мм/год, E – суммарное испарение, P – годовая сумма осадков
- Сток = Осадки - Испарение



Возможное изменение суммарного стока с водосбора при наиболее вероятном сценарии изменения климата для территории МАБ

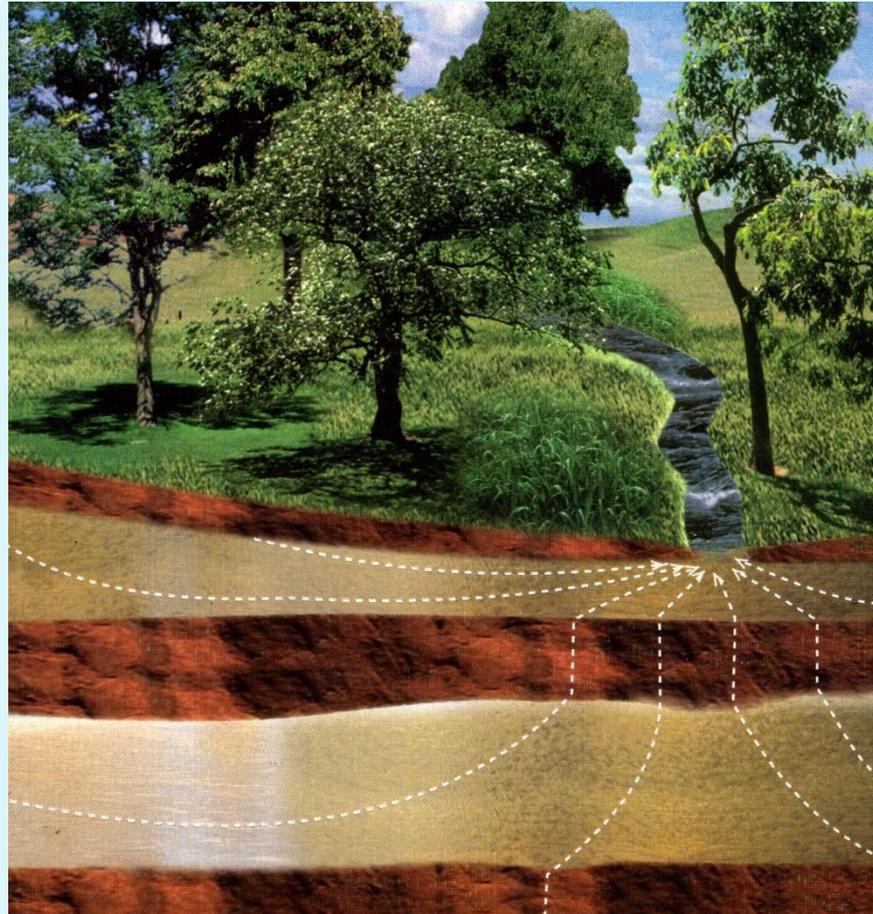


Изолинии - изменение годового стока мм.

Возможное изменение суммарного стока с водосбора при наиболее вероятном сценарии изменения климата для территории МАБ -резюме

- Глобальные циркуляционные модели предсказывают, что наиболее вероятен на Европейской части России **рост температуры на примерно 4 градуса за сто лет**
- Изменение осадков пересказываются существенно хуже. По сценарию В1 пересказывается их **небольшой рост (5-15%)**
- Следовательно существенного изменения общего не следует ожидать – увеличение испаряемости примерно на 80-100 мм возможно компенсируется увеличением осадков
- Как изменится соотношение поверхностной и подземной части стока???

Подземные воды и ландшафты – как изменение условий на поверхности земли скажется на подземных водах?



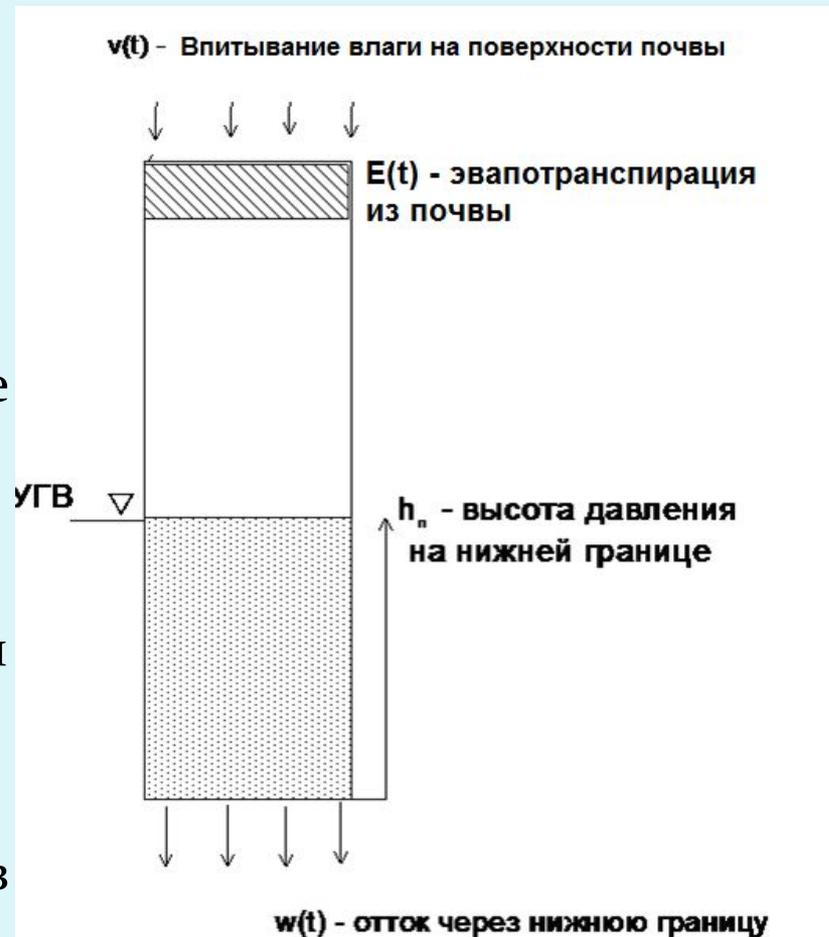
Модель для оценки влияния изменения климата

- Модель состоит из трех расчетных блоков.
 - Первый блок – трансформация осадков на поверхности земли
 - Второй блок – влагоперенос в зоне аэрации
 - Третий блок – геофльтрация в зоне полного насыщения
- **Питание подземных вод в данной модели** – расход потока через нижнюю границу зоны аэрации – интерфейс между вторым и третьим блоками



Модель для оценки влияния изменения климата – первый и второй блоки

- Моделируемые процессы, определяющие баланс влаги на поверхности земли в зоне аэрации:
 - Выпадение осадков, задержка растительностью, накопление снега, испарение с поверхности листьев, впитывание в почву
 - Формирование поверхностного стока с талой и мерзлой почвы
 - Эвапотранспирация влаги из корнеобитаемого слоя
 - Вертикальный влагоперенос в зоне аэрации от поверхности земли до ее нижней границы зоны



Первый блок: Трансформация осадков на поверхности земли: моделируемые процессы

- Выпадение осадков, их накопление в виде снега, таяние, задержкой растительностью, формирование стока с учетом состояния почвы: талая или мерзлая
- Расчет потенциальной эвапотранспирации,
- Расчет испарения с поверхности листьев растительности, на которых задержались осадки
- Результат – суточный объем влаги, который впитывается в почву с поверхности

Процессы на поверхности земли – пример модели трансформации влаги

- Трансформация влаги зимой: Базовые переменные: V_s – слой снега, V_l – слой воды, H_s – мощность снега, T_s – температура снега

$$\frac{dV_s}{dt} = P_s - Q_f$$

$$\frac{dV_l}{dt} = P_l + Q_f - E \cdot S - K_s S^n$$

$$Q_f = \begin{cases} k_{melt} \cdot T & ; T > 0, V_s > 0 \\ -k_{melt} \cdot \sqrt{|T|} & ; T < 0, V_l > 0 \end{cases}$$

$$\frac{dH_s}{dt} = \rho_w (P_s / \rho_s^0 - Q_f' / \rho_s) - v_s$$

$$C_s \frac{d}{dt} (\bar{T}_s H) = Q_a - Q_g - \chi \rho_w M + \chi \Phi$$

Трансформация осадков на поверхности земли (входные и выходные данные)

● Входные данные ряды суточных:

- осадков $O(t)$,
- Минимальной и максимальной температуры $T(t)$,
- солнечной радиации $R(t)$
- динамики индекса развития поверхности листьев LAI(t) растительности

● Выходные данные ряды суточных объемов:

- Власти, впитывающихся в почву с поверхности $V(t)$
- Потенциальной эвапотранспирации $E_p(t)$
- Поверхностного стока $R(t)$

Второй Блок: Влагоперенос в зоне аэрации (модель Hydrus 1-d)

- Одномерная вертикальная насыщенно-ненасыщенная фильтрация от поверхности земли до нижней границы, расположенной :
 - глубже зоны колебания уровня грунтовых вод при их близком залегании
 - На глубине зоны гравитационного стекания влаги ($dH/dz=-1$) при глубоком залегании уровня
- В зоне аэрации выделяется корнеобитаемая зона из которой происходит отбор воды корнями растений

Влагоперенос в зоне аэрации (входные и выходные данные)

- Входные данные ряды суточных объемов:
 - Власти, впитывающихся в почву с поверхности $V(t)$
 - Потенциальной эвапотранспирации $E_p(t)$ за вычетом испарившейся с поверхности листьев влаги
- Выходные данные ряды суточных объемов:
 - Суммарного испарения из почвы $E(t)$
 - Стока через нижнюю границы модели – то есть питания подземных вод $W(t)$

Третий Блок: региональная нестационарная модель потока подземных вод (MODFLOW)

- Модель потока подземных вод в его естественных границах
 - Входные данные: переменное во времени питание подземных вод, рассчитанное в предыдущем блоке (для каждого узла, или серии узлов, объединенных в зону с одинаковыми условиями питания)
 - Выходные – изменение уровней подземных вод и их разгрузки в реки

Как использовать эту модель для оценки влияния изменения климата?

- Промоделировать процесс при стационарных входных рядах:
 - осадков $O(t)$,
 - температур $T(t)$, $^{\circ}\text{C}$
 - солнечной радиации $R(t)$
- То же самое для измененных с учетом прогноза изменения климата рядов
- Разница – влияние изменения климата на питание

Как использовать эту модель для оценки влияния изменения климата?

(продолжение)

- Для моделирования входных рядов использовался генератор метеоданных:

LARS-WG: A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies (Semenov M. 2002)

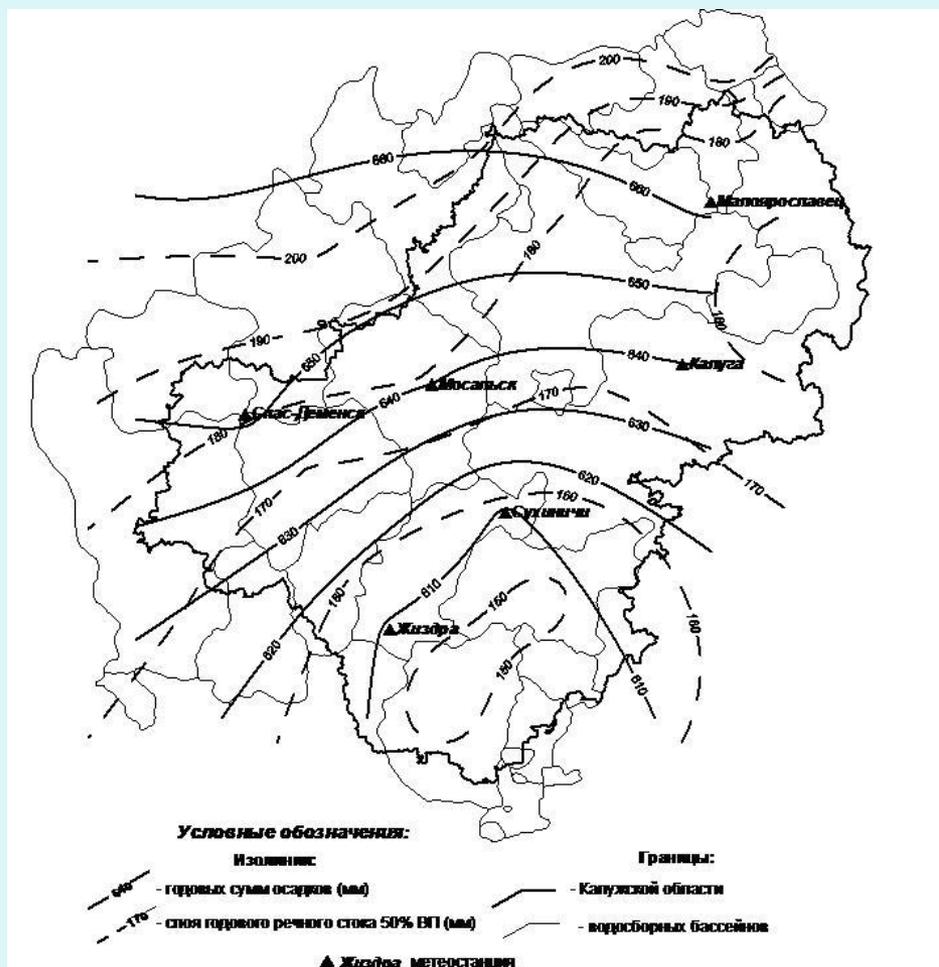
- LARS-WG позволяет:
 - Генерировать стационарную серию суточных метеоданных любой длины, “обучившись” на наблюдаемых метеоданных за несколько десятков лет
 - Вводить в генерируемые ряды сценарии изменения любого из метеорядов: осадков, мин. суточных температур, max. суточных температур, радиации

Как использовать эту модель для оценки влияния изменения климата? (продолжение)

- Сценарии вводятся на месячном уровне, то есть задается, как изменяются среднемесячные параметры генерируемых рядов относительно исходных параметров рядов на которых проводилось “обучение” генератора

[USE OF A STOCHASTIC WEATHER GENERATOR IN THE DEVELOPMENT OF CLIMATE CHANGE SCENARIOS, by M. Semenov, E Barrow, *Climatic Change* 35: 397-414, 1997. ©1997 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.]

Применение модели к юго-западной части Московского Артезианского Бассейна (МАБ) – территория Калужской области



Моделирование : наблюдаемые тренды температуры по метеостанции г. Сухиничи за последние 30 лет

Метеостанция	Месяц	Уравнение регрессии дл тренда температуры	значимость регрессии
Сухиничи 1959-2004	январь	Raw Predicted Values = -6,748 + ,22266 * янв	значима
	февраль	Raw Predicted Values = -7,162 + ,09615 * фев	значима
	март	Raw Predicted Values = -2,173 + ,14237 * мар	значима
	апрель	Raw Predicted Values = 5,0756 + ,11960 * апр	значима
	май	Raw Predicted Values = 12,552 + ,01131 * май	нет
	июнь	Raw Predicted Values = 16,206 + ,46E-4 * июн	нет
	июль	Raw Predicted Values = 17,514 + ,02314 * июл	нет
	август	Raw Predicted Values = 16,186 + ,00432 * авг	нет
	сентябрь	Raw Predicted Values = 10,757 + ,00376 * сен	нет
	октябрь	Raw Predicted Values = 4,9708 + ,00393 * окт	нет
	ноябрь	Raw Predicted Values = -1,459 + ,01249 * ноя	нет
	декабрь	Raw Predicted Values = -6,281 + ,24E-3 * дек	нет

Моделирование на примере бассейна Жиздры Калужской области

- Более чем 40 летний ряд суточных наблюдений по метеостанции Сухиничи применялся для “обучения” LARS WG моделированию стационарного ряда метеоданных в р-не г. Сухиничи
- В качестве прогнозного сценария изменения климата использовалось следующее:
 - За будущие сто лет среднегодовая температура вырастет на 4.5 градусов
 - Летние температуры вырастут не более чем на 2 градуса, а основной рост температур будет в холодный период года
 - Солнечная радиация не изменится
 - Осадки увеличатся в зимний период примерно на 15% и сократятся в летний период примерно на 5%

Моделирование на примере Калужской области:

Базовый и измененный сценарии климата

<i>Месяц</i>	<i>Базовая Температура</i>	<i>Увеличение Температуры за 100 лет</i>	<i>Осадки мм</i>	<i>Коэффициент т Осадков</i>
1	-10.6	7.5	30.6	1.2
2	-8.9	7	26.2	1.15
3	-3.3	6	28.5	1.1
4	5.1	4	41.3	1.05
5	12.8	3	42.6	1
6	16.1	3	65.2	1
7	17.7	2	76.5	0.95
8	16.1	3	70.3	1
9	10.8	4.5	48.4	1.05
10	4.9	6	48.2	1.1
11	-0.8	7	46.4	1.15
12	-6	7	41.9	1.2

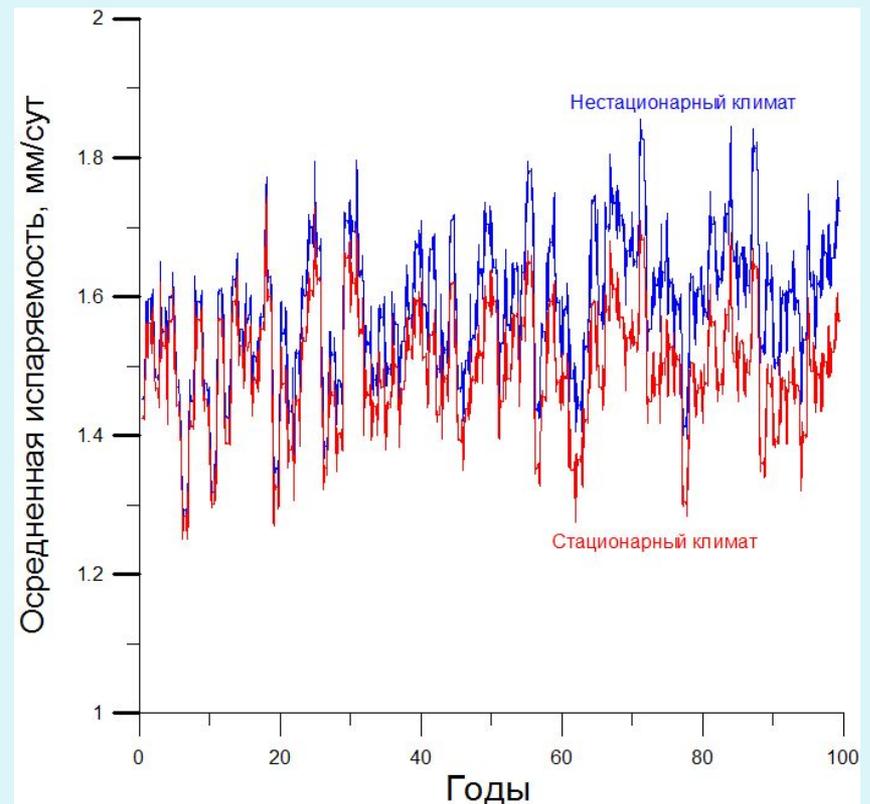
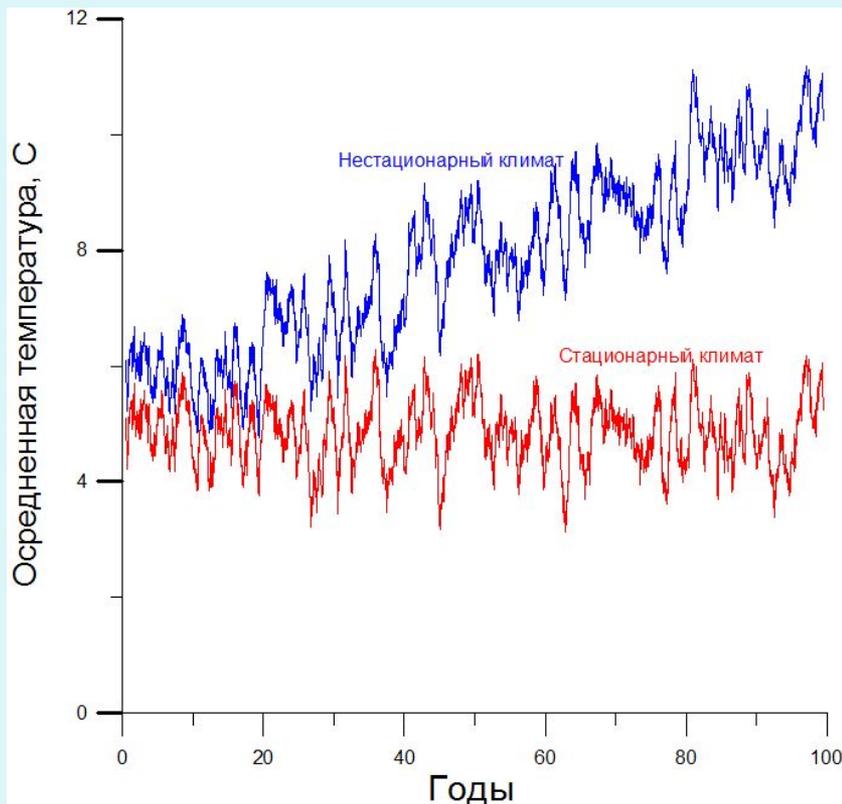
Результаты моделирования питания

- Для расчета питания моделировалась зона аэрации, представленная в основном песчанистым разрезом (что характерно для флювиогляциальных отложений, развитых в районе г.Сухиничи)
- Полагалось, что уровень грунтовых вод расположен достаточно глубоко на глубине 5м, поэтому на нижней границе зоны аэрации использовалось граничное условие постоянного напора

Осредненные входные ряды

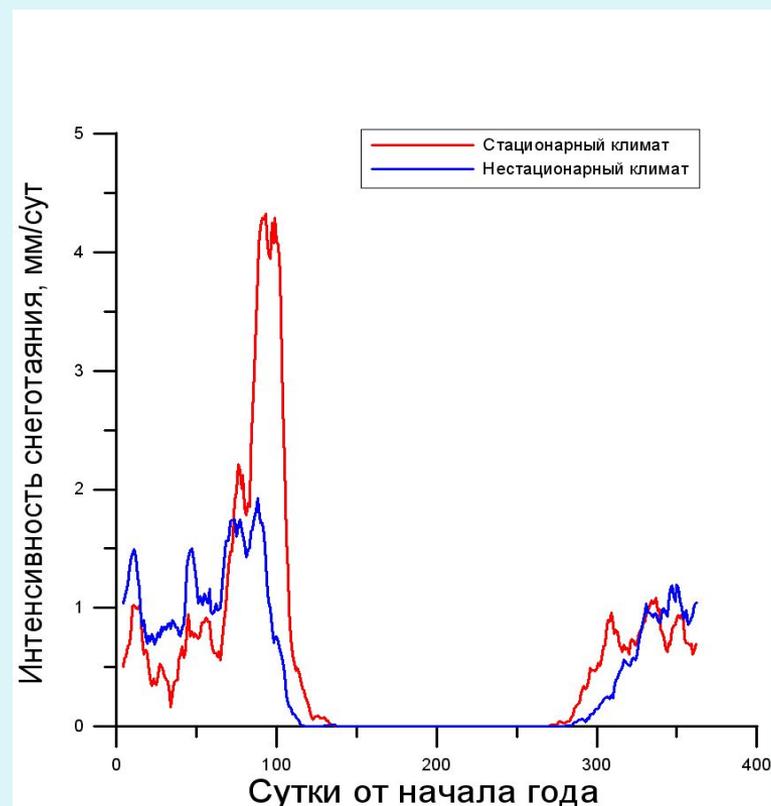
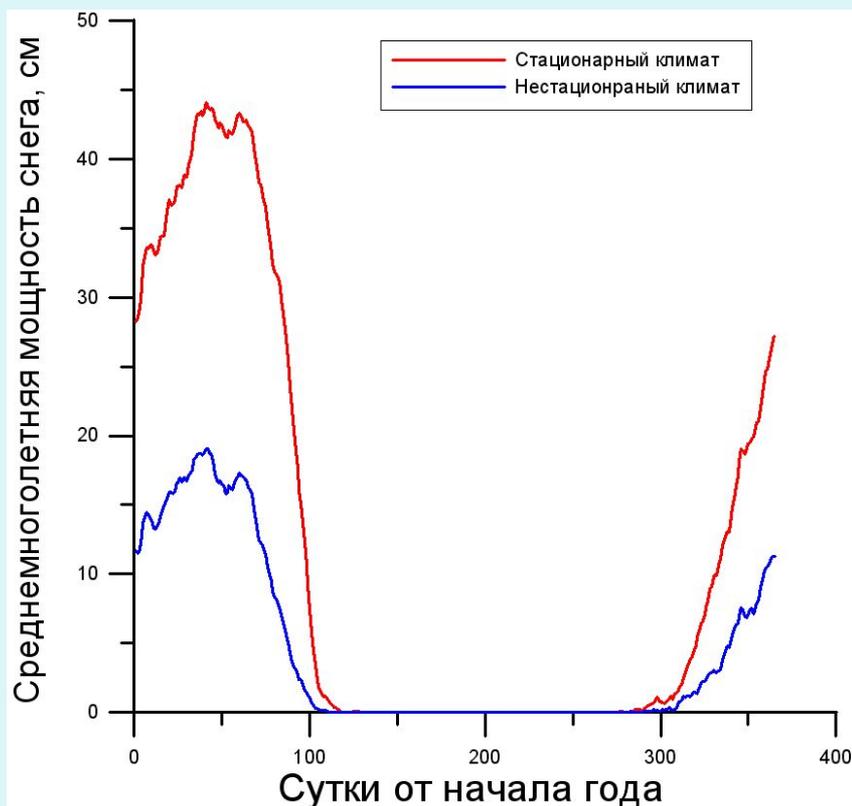
Модельная температура

Расчетная испаряемость

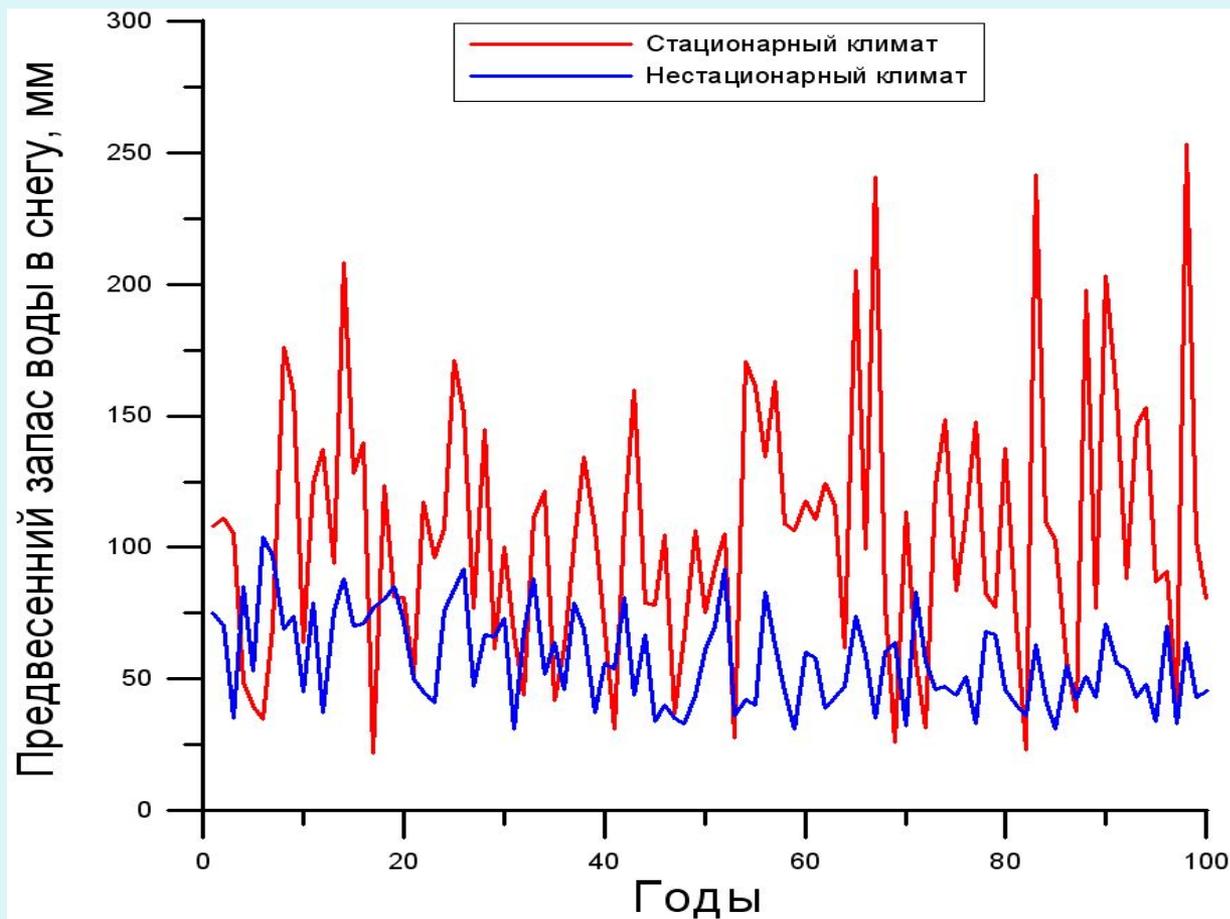


Результаты моделирования

Высота снежного покрова Интенсивность снеготаяния



Предвесенний запас влаги в снегу

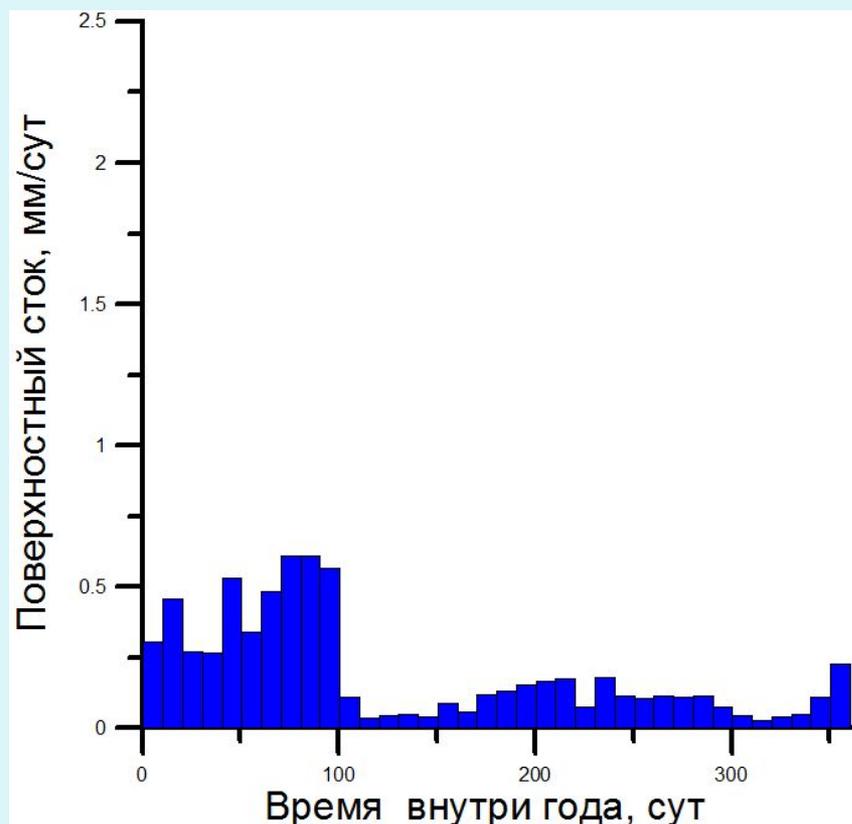
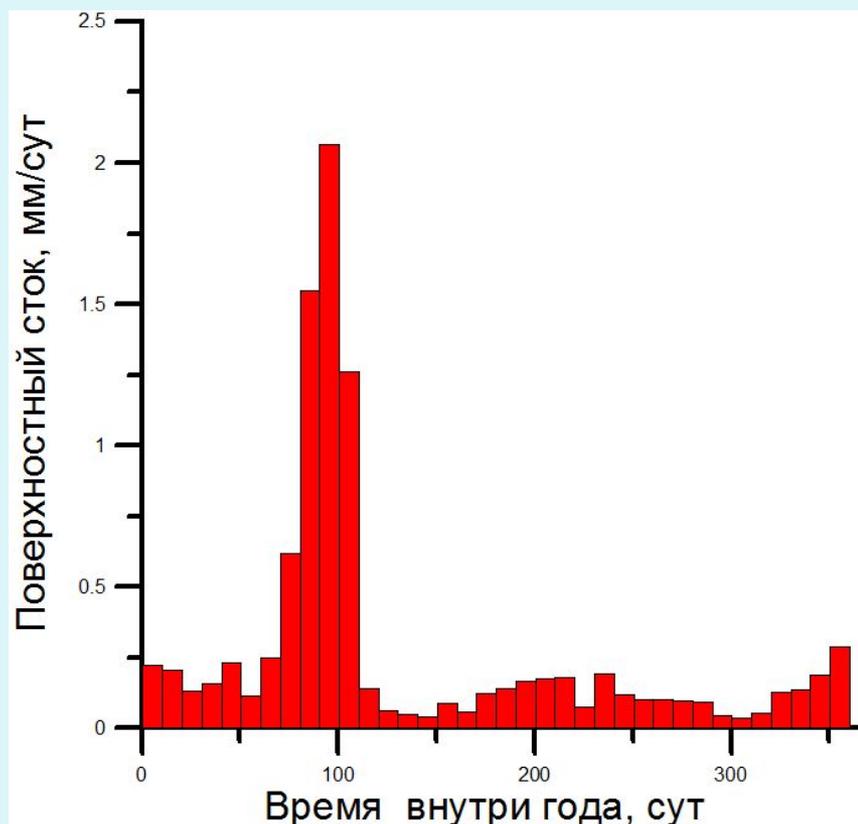


Результаты моделирования:

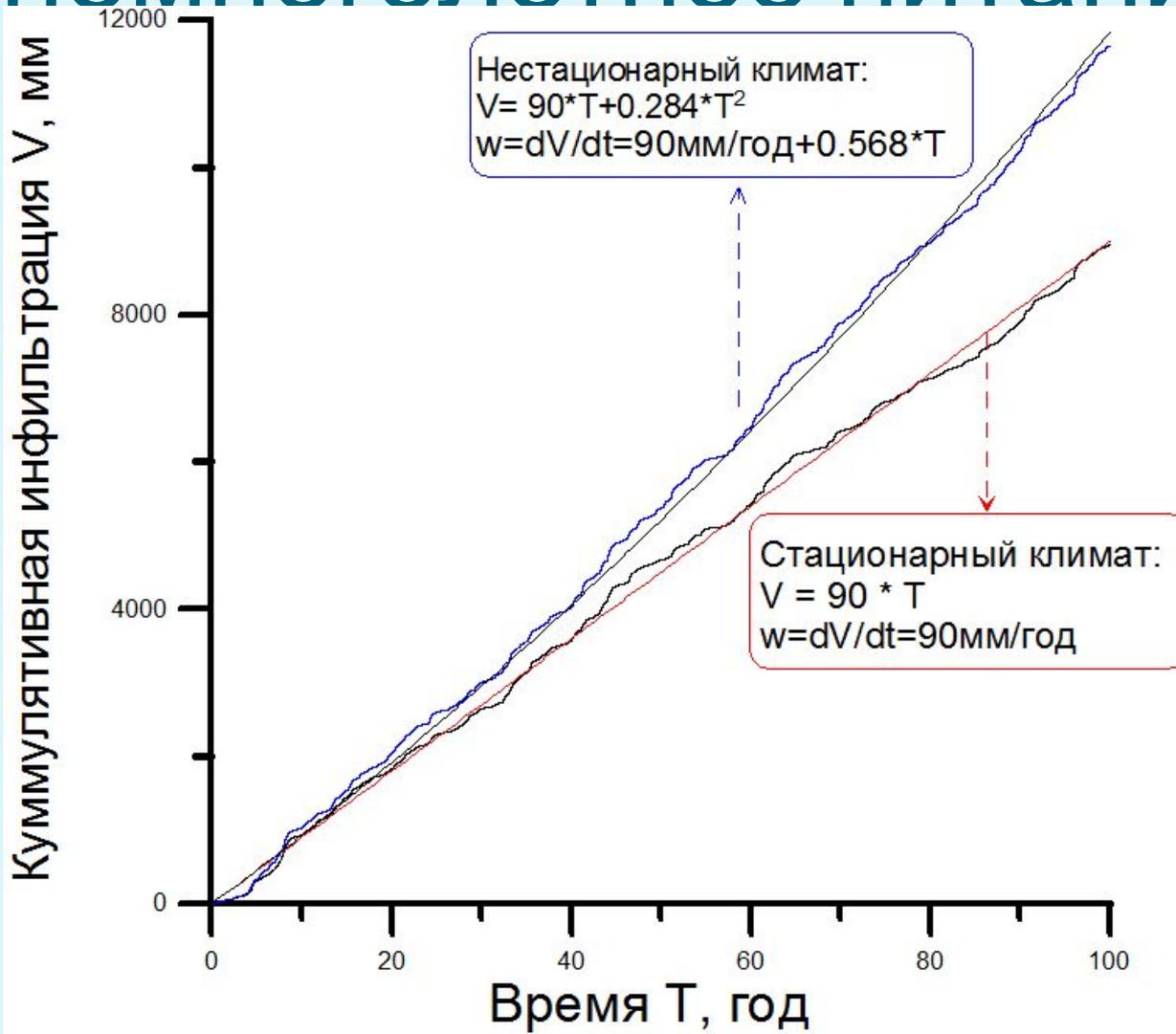
Изменчивость поверхностного стока:

стационарный климат

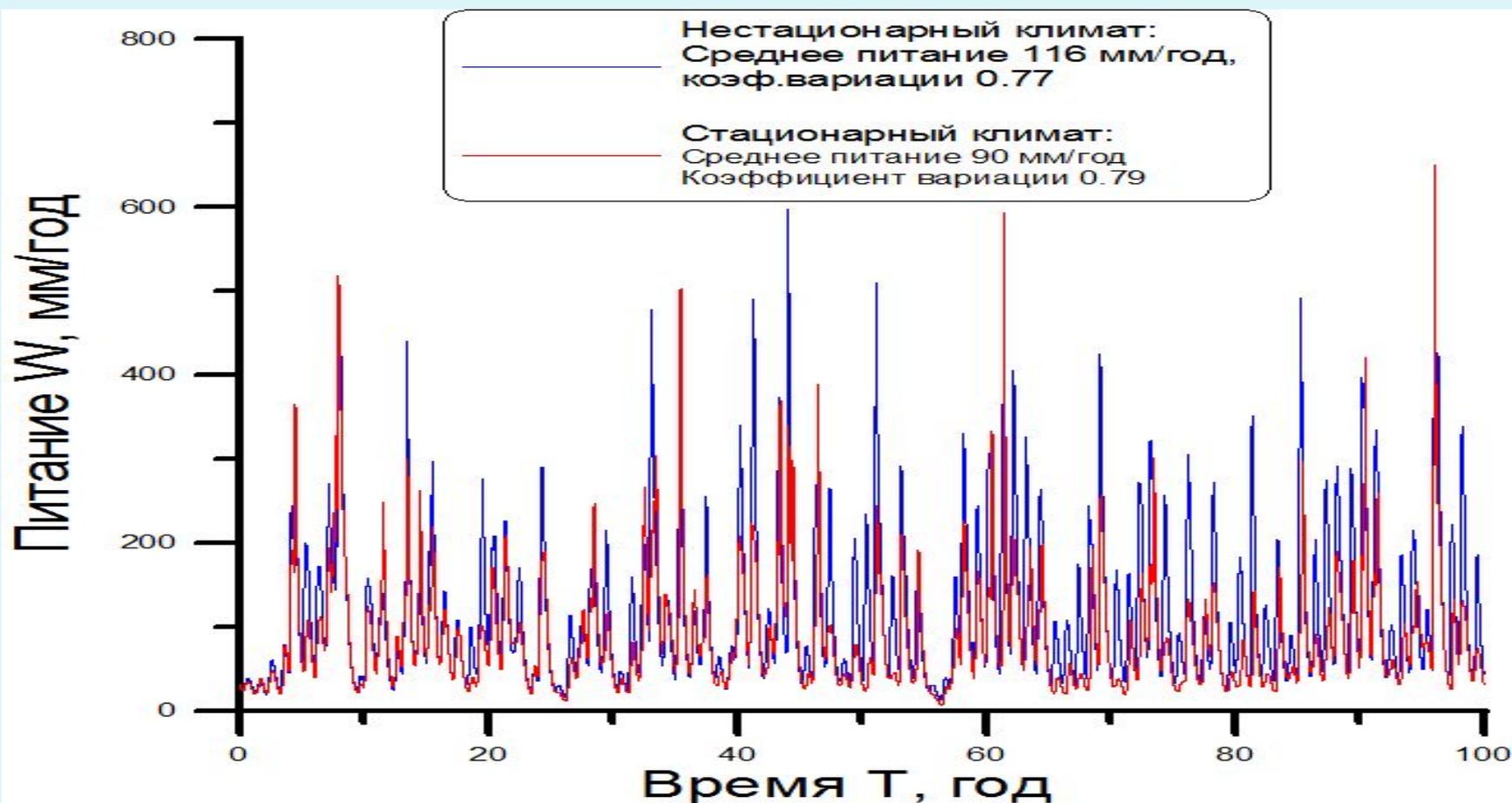
нестационарный климат



Результаты моделирования: среднемноголетнее питание

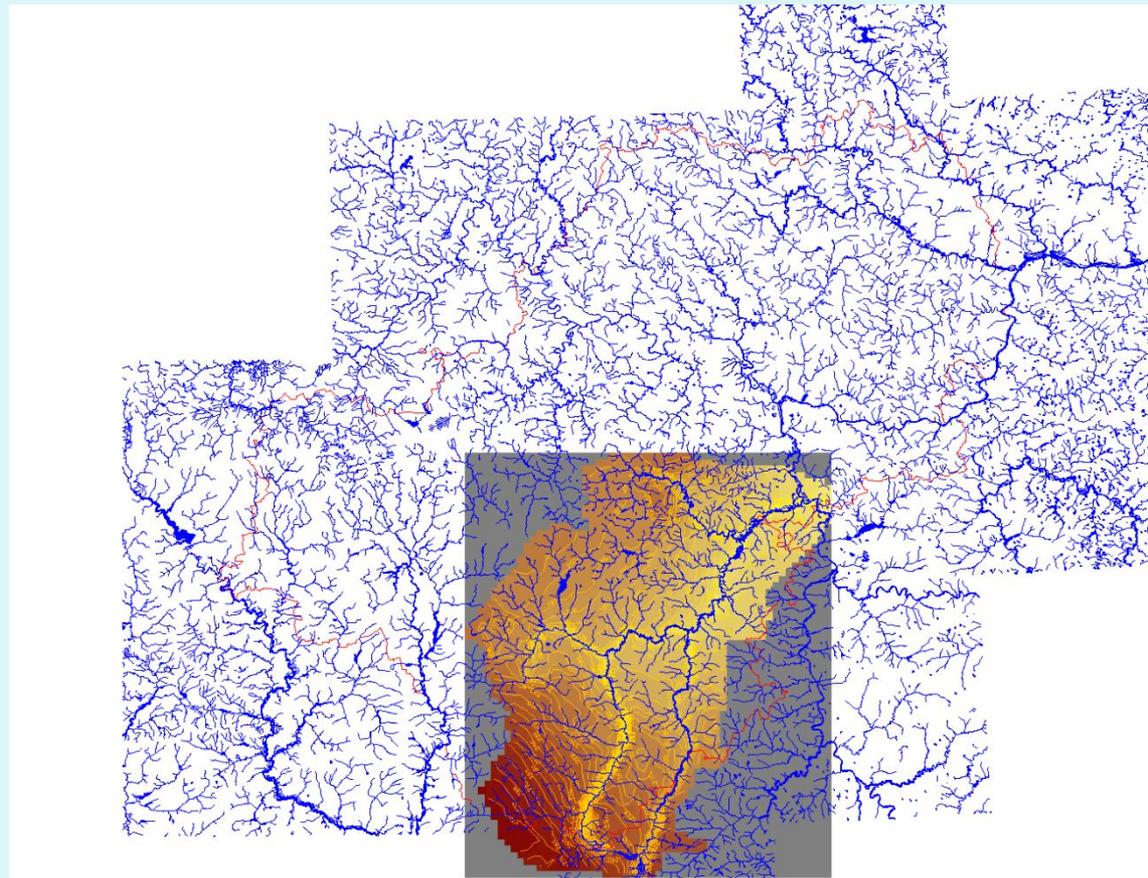


Результаты моделирования: временная изменчивость питания

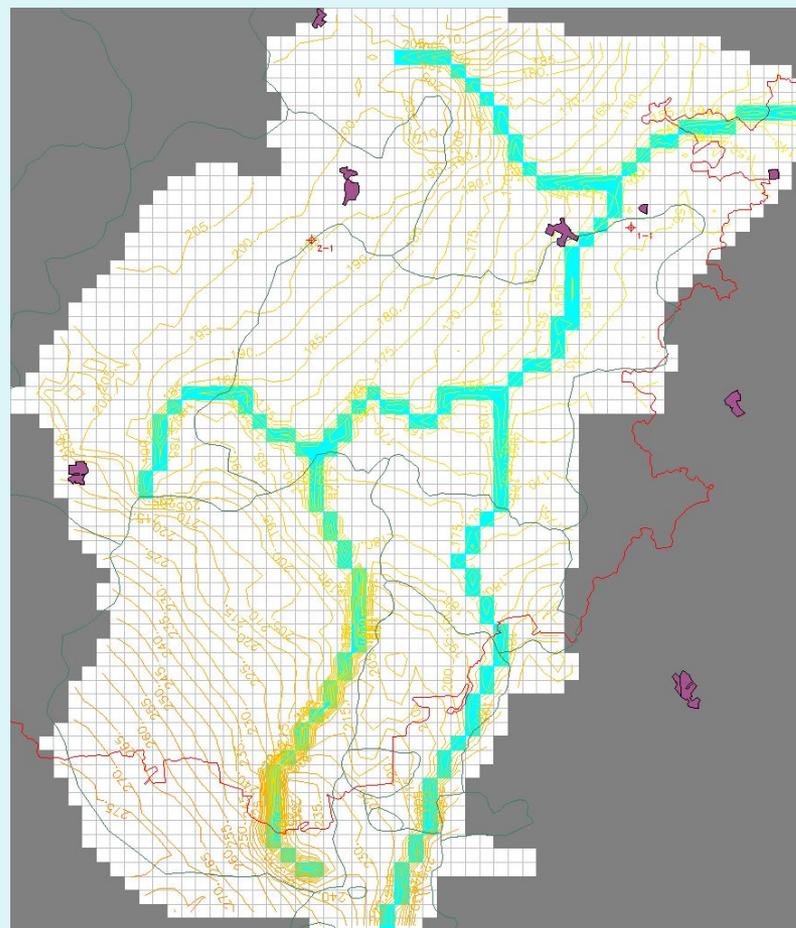
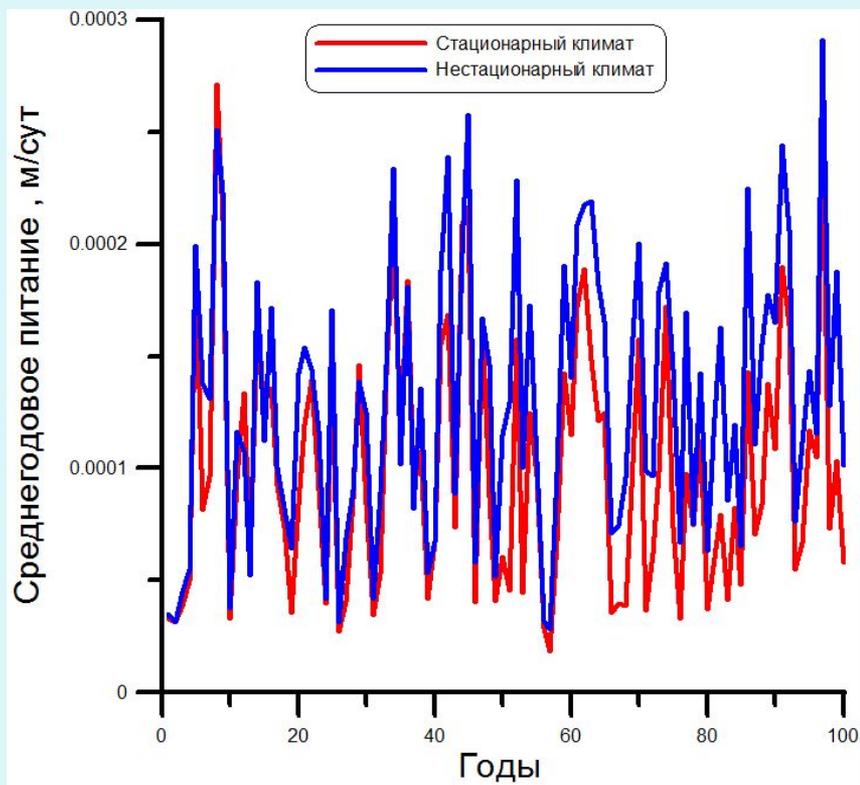


Третий блок: региональная нестационарная модель потока подземных вод бассейна Жиздры

- Модель бассейна р. Жиздры вырезана из региональной модели юго-западной части МАБ (С.О. Гриневский, 2006)
- Модель имеет размеры 60*50 км и включает 12 основных пластов и разделяющих толщ, представленных в регионе
- Питание, разгрузка в реки, водоотбор – основные статьи баланса
- Испарение подземных вод при близком УГВ не учитывается

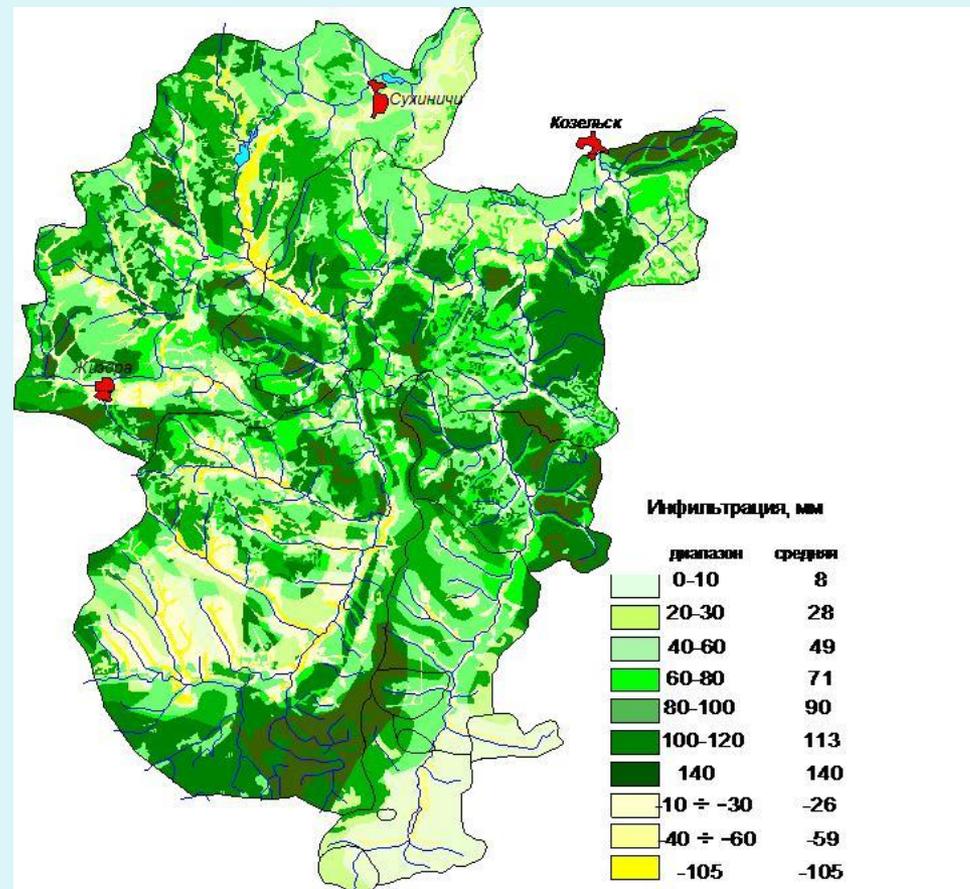


Региональная нестационарная модель потока подземных вод бассейна Жиздры – два сценария изменения среднегодового питания в 21 веке



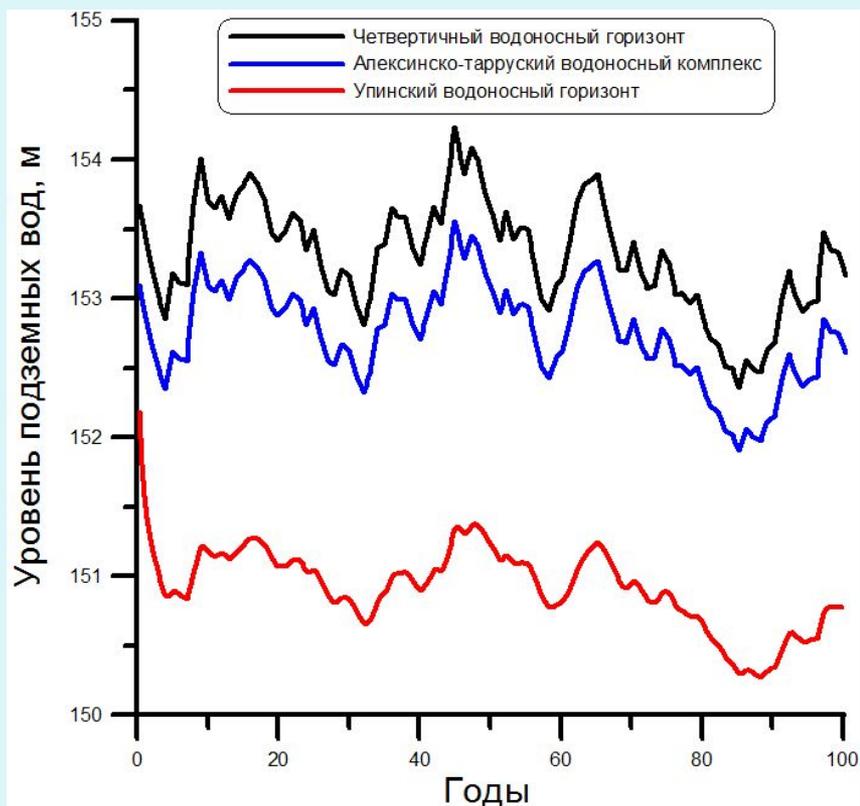
Питание подземных вод

- Среднемноголетняя карта питания подземных вод
- Питание подземных вод каждый год меняется в соответствии с питанием полученным на модели влагопереноса для
 - А) стационарного климата
 - Б) нестационарного климата
- $w^*(t) = w_{sr}(x, y) * K(t)$
- $K(t) = W_{mod}(t) / W_{srMod}$

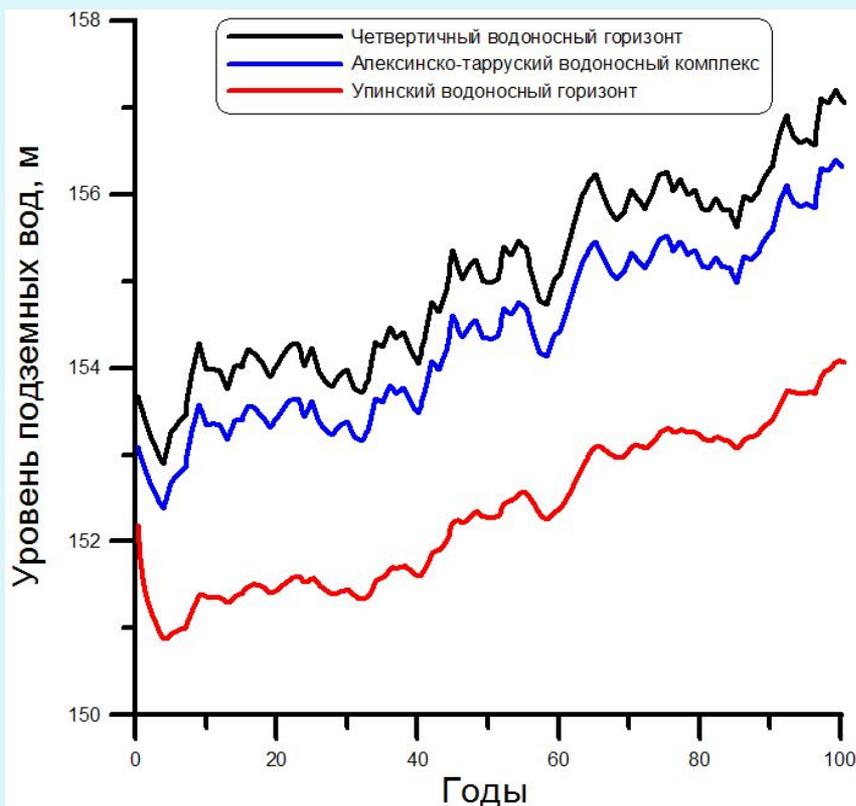


Результаты моделирования 100 летней динамики уровней подземных вод на региональной модели: ку́ст в долине р. Жиздры

Стационарный климат

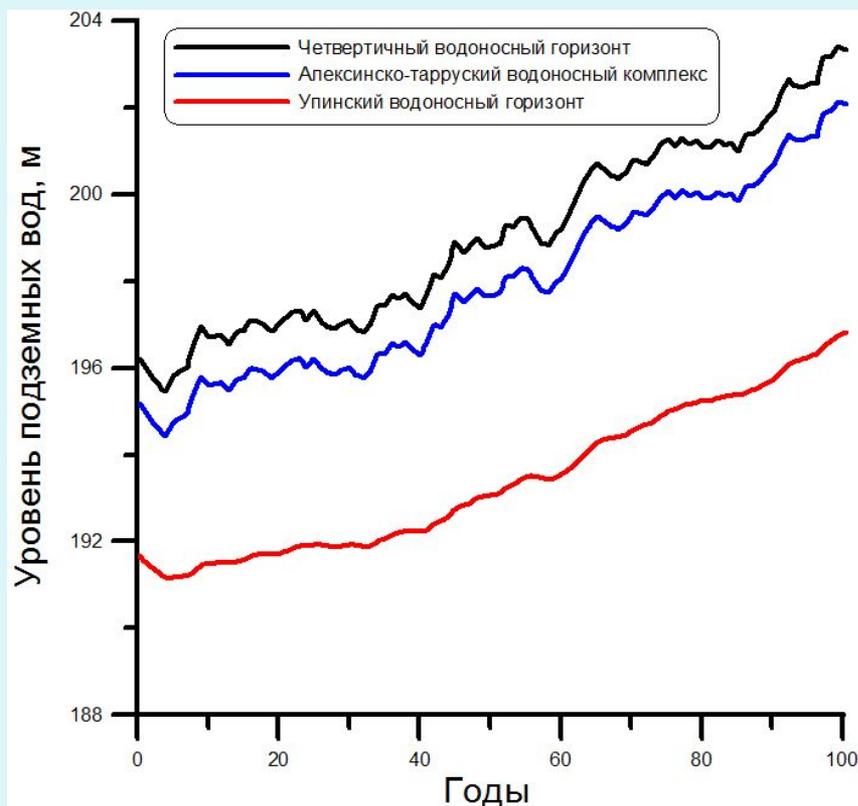
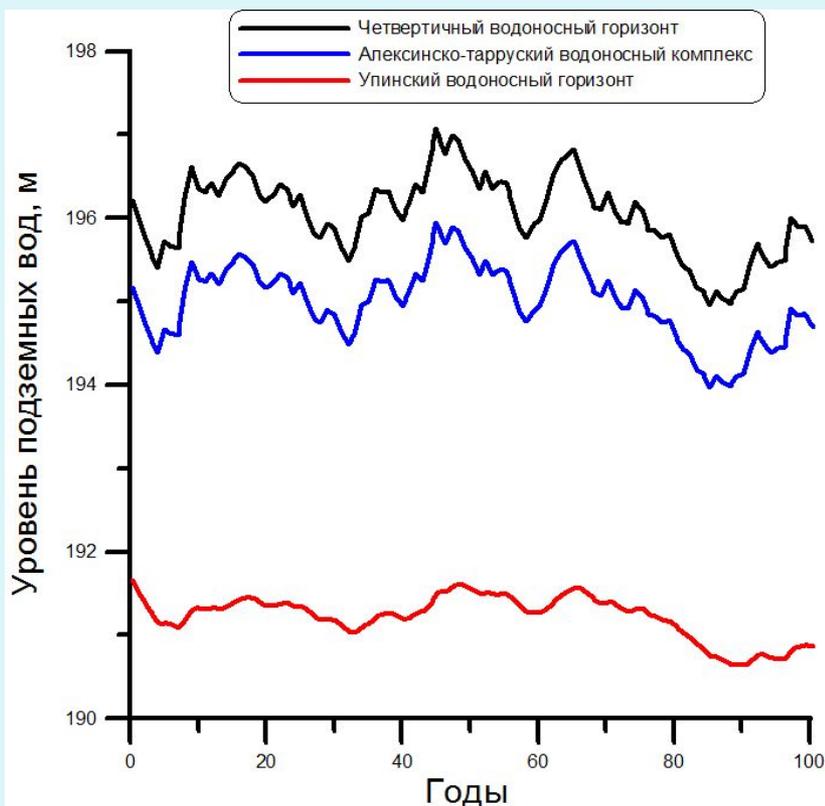


Нестационарный климат



Результаты моделирования 100 летней динамики уровней подземных вод на региональной модели: куст в районе водозабора г. Сухиничи

Стационарный климат Нестационарный климат



Выводы

- Моделирование показало существенное влияние изменения климата на питание подземных вод, приводящее к его увеличению в исследуемом бассейне и возможному подъему уровней подземных вод
- Основным механизмом определяющим увеличения питания в рассмотренной модели является сокращение поверхностного талого стока и, соответственно:
- Инфильтрация в период зимних оттепелей

Выводы -продолжение

- Неясно, как процессы перераспределения влаги скажутся на среднегодовом поверхностном стоке, так как увеличение инфильтрационного питания приводит к подъему уровней, что в свою очередь увеличит области потенциальной эвапотранспирации грунтовых вод и разгрузке в малые перемерзавшие ранее ложбины стока, то есть суммарный сток может не сильно измениться
- Поскольку потепление уже идет целесообразно провести многолетний анализ рядов наблюдений за режимом подземных вод для выявления трендов в уровнях, например в США такая работа уже проводится:
<http://groundwaterwatch.usgs.gov>