

**Методика оценки влияния глобального изменения климата на
урожайность сельскохозяйственных культур.**

(для использования в возможных диссертационных работах магистров, аспирантов и докторантов)

Проф. д.т.н. Никольский Ю.Н.

Предисловие

Оценкой ожидаемого влияния глобального изменения климата к концу 21го века на продуктивность земледелия занимаются во многих странах мира. Эти оценки периодически уточняются в связи с появлением новых результатов моделирования глобального климата в зависимости от сценариев роста населения, изменения экологической обстановки и накопления парниковых газов в атмосфере.

Для оценки влияния долгосрочного изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур применяются различные подходы (биологические, статистические, экономические и др.), основанные на учете биологических особенностей растений и их реакции на изменение климата, статистическом анализе вариации урожайности по годам в настоящее время, на учете экономических затрат на получение урожая в различные по климатическим условиям годы и т.д.

В большинстве стран мира для расчета урожайности в зависимости от характерной информации о среднемесячных значениях температуры воздуха, солнечной радиации, осадков и среднегодового содержания углекислого газа применяется формула Де Витта (De Wit, 1965). Подобный подход развивался и в Советском Союзе в 1970-80х годах. В настоящее время в России, как правило, используются другие более упрощенные подходы.

Формула Де Витта рекомендована ФАО для агроэкологического районирования территорий мира (FAO/IIASA, GAEZ v.3.0, 2012; вообще GAEZ

совершенствуется с 2000 года, когда вышла первая ее версия; в 2021 г вышла 4я ее версия) и используется также для оценки влияния глобального изменения климата на продуктивность земледелия. FAO периодически обновляет издание рекомендаций GAEZ. К сожалению, оценка влияния глобального изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур даже с помощью формулы Де Витта (не говоря о различных трудно сопоставимых методиках такой оценки) требует использования множества исходных данных, разбросанных в различных публикациях и одинакового (или подобного) порядка расчетов. Ни в одной публикации (в том числе, в GAEZ) необходимого комплекса исходных данных нет. Поэтому часто методические подходы в существующих публикациях значительно отличаются друг от друга, что затрудняет или делает невозможным сопоставление результатов таких оценок, выполненных даже для одной и той же сельскохозяйственной культуры в различных регионах и даже в одинаковых регионах мира. К сожалению, в работах, как правило, не учитывается фактор возможного влияния медленно изменяющегося климата на продуктивность почв, что может оказать дополнительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Методику оценки такого влияния разработал автор данной работы. В течение ряда лет он со своими аспирантами уточнял и дополнял методику оценки влияния глобального изменения климата на продуктивность земледелия в различных климатических зонах Мексики в условиях сложного рельефа. Был опубликован ряд статей в журналах и книгах различных стран. Для оценки качества расчетов урожайности предложено предварительно проводить верификацию результатов расчетов на основе их сравнения для климатических условий начала 21го века с имеющимися статистическими данными.

Для этого и составлена данная методика. К ней прилагаются систематизированные исходные данные, взятые из различных опубликованных источников, а также описывается разработанная методика оценки ожидаемого влияния медленно изменяющегося климата на продуктивность почв. Поэтому в

совокупности предлагаемая методика является оригинальной. Прежде всего, она может быть полезной в учебных и исследовательских целях в процессе выполнения работ аспирантами, докторантами и даже на уровне магистратуры в различных областях, связанных с оценкой влияния глобального изменения климата на продуктивность земледелия.

Цель работ: Оценить, насколько изменится урожайность выбранной сельскохозяйственной культуры в заданном регионе (от поля до области и больше) в середине или конце 21го века в зависимости от сценария изменения климата и модели прогноза его изменения. При этом используется модель расчета урожайности ФАО (FAO/IASA, 2012), широко используемая в мире и основанная на зависимости урожайности от климата (среднемесячных значений, в основном, температуры воздуха, солнечной радиации, осадков), концентрации CO_2 в атмосфере и биологических особенностей сельскохозяйственной культуры. По сравнению с другими существующими подходами по оценке влияния изменения климата на урожай, где отдельно учитывается влияние температуры или осадков, или солнечной радиации, или концентрации углекислого газа в атмосфере, модель ФАО рассматривает совокупное действие этих факторов на процесс фотосинтеза и конечную продукцию.

Учитывая, что не известно, как в будущем изменятся сорта сельскохозяйственных культур и технология их возделывания (включая системы удобрений, технологию и средства химической защиты растений, технологию обработки почвы и др.), расчет выполняется с целью узнать, насколько под влиянием изменения климата изменится урожайность при сохранении существующих сортов сельскохозяйственных культур и технологии их возделывания.

Ограничения:

В виду неопределённости развития технологии земледелия в будущем, расчёт не учитывает:

- Возможность изменения сортов и технологии возделывания сельскохозяйственных культур, а также технологии уборки и хранения продукции растениеводства;
- Возможное изменение болезней растений и их вредителей (насекомых и т.д.). Предполагается, что средства защиты растений будут успешно развиваться по мере необходимости;
- Возможное изменение форм, доз и технологии внесения удобрений (например, с применением нанотехнологий и созданием «интеллектуальных» минеральных удобрений или с применением новых технологических пакетов органического земледелия, которые могут появиться в будущем.

Исходная информация для выбранных сельскохозяйственных территорий (желательно использовать цифровую информацию в виде карт и приложений):

1. Топография поверхности изучаемых сельскохозяйственных регионов России или других стран от поля до области и более в масштабе примерно 1:5000.
2. План территории с указанием контуров с.х. земель и типом их использования (пашня с определенными с.х. культурами, лес, луга, наличие и отсутствие орошения или дренажа).
3. Урожайность с.х. культур по годам в начале 21го века (возможно, от опытной станции до региона).
4. Свойства почв: текстура, гумус, N , P , K , pH или бонитет. Районированные дозы удобрений по с.х. культурам и районам.
5. Даты появления всходов выбранной с.х. культуры:
 - по годам с известными месячными климатическими данными и в среднем за многолетний период
 - или

- в зависимости от суммы активных суточных температур воздуха, соответствующие прохождению основных этапов развития растений.

6. Среднемесячные климатические данные по последовательным 10-15 годам в начале 21го века: осадки, температура воздуха, суммарная солнечная радиация и другие показатели, необходимые для расчета эвапотранспирации (например, дефицит влажности воздуха, испарение с водной поверхности, радиационный баланс).

7. Результаты прогноза изменения климата в выбранном регионе: ожидаемые среднемесячные данные по температуре, осадкам, суммарной радиации или радиационному балансу, содержание CO₂ в атмосфере.

Методическая основа

Методика ФАО по агро-экологическому районированию стран мира (FAO/PIASA, 2012), впервые излагаемая в комплексе с необходимыми приложениями (их 11 штук) применительно к проблеме оценки влияния глобального изменения климата на продуктивность сельскохозяйственных земель.

Эта методика дополнена впервые разработанным методом учета возможного изменения плодородия почв под влиянием изменяющегося климата в течение 21 века.

Приложения:

Таблица 1. Значения A_c (кал см⁻² сут⁻¹), b_c и b_o (кг га⁻¹ час⁻¹) при $P_m = 20$ кг га⁻¹ час⁻¹ (de Wit, 1965, p. 48, Table 6; Driessen and Konijn, 1992, p. 48)

Таблица 2. Продолжительность вегетации N , тип фотосинтеза, величины H и максимальные за вегетацию LAI в зависимости от уровня интенсивности земледелия, а также P_m в зависимости от температуры воздуха T для ряда сельскохозяйственных культур

Таблица 3. Типичные максимальные за вегетацию значения относительной площади листьев LAI^{veg} для различной растительности типичные для различных

климатических зон, а также средние величины продолжительности вегетации и сроков сева в Центральной черноземной зоне России (Шумова, 2017)

Таблица 4. Суммы эффективных среднесуточных температур воздуха $\sum T_{effect} = \sum(T_{cp} - T_0) = \sum\{(T_{max} + T_{min})/2\} - T_0$ необходимых для полного вызревания сельскохозяйственной культуры; $T_0 = 5^\circ\text{C}$, T_{cp} , T_{max} и T_{min} – соответственно, средняя, максимальная и минимальная суточные температуры воздуха (Шумова, 2017)

Таблица 5. Распределение относительной площади листьев LAI/LAI^{veg} различных растений (где LAI^{veg} – максимальная LAI в течение вегетации) в зависимости от относительного времени N/N^{veg} в течение вегетации (Шумова, 2017)

Таблица 6. Средний за вегетацию коэффициент чувствительности сельскохозяйственных культур к недостатку или избытку почвенной влаги k^y (FAO, 2012) (более точные значения k^y для отдельных фаз развития растений можно найти в публикации (FAO, 2012))

Таблица 7. Величины безразмерного коэффициента k^c в начале (k^c_{mic}), середине (k^c_{mid}) и в конце вегетации (k^c_{end})* (Allen, Pereira, Raes, Smith, 1998)

Таблица 8. Глубина расчетного слоя почвы при орошении (СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения)

Таблица 9. Солнечная радиация R_a на верхней границе атмосферы в начале 21го века ($\text{Дж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$)

Таблица 10. Продолжительность светлого времени суток τ (час) в различных регионах мира

Таблица 11. Переходные коэффициенты K_p от испарения с водной поверхности $E_{вод}$ эвапориметра США класса А диаметром 120 см к испаряемости с травяной растительности ET_0 для различных случаев установки прибора и окружающей среды, а также различных уровней средней относительной влажности и скорости ветра

Пример имеющегося в литературе прогноза изменения среднемесячной температуры воздуха (°C) в определенном месяце в течение вегетации на конец 21го века под влиянием глобального изменения климата в заданном регионе по имеющимся моделям циркуляции атмосферы (их несколько десятков):

Модель циркуляции атмосферы								
GFDC-R30	GFDL-CM3	CCC	CSIRO	MCG	MIRO C32	HADCEM2 ES	MPI ESM LR	CM3
+ 3,51	+ 2,81	+ 5,03	+ 0,89	+ 2,75	+ 1,38	+ 3,23	+ 2,51	+ 1,82

ВОЗМОЖНЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В 21-М ВЕКЕ: ОЦЕНКИ ПО АНСАМБЛЮ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В.П.Мезешко⁽¹⁾, Г.С.Голыгин⁽²⁾, В.А.Говоркова⁽¹⁾, П.Ф.Демченко⁽²⁾, А.В.Елисеев⁽²⁾, В.М.Катков⁽¹⁾, С.П.Мазевский-Мазевин⁽¹⁾, И.П.Мохов⁽²⁾, Е.Д.Надежина⁽¹⁾, В.А.Семенов⁽²⁾, П.В.Спорышев⁽²⁾, В.Ч.Хонг⁽²⁾

(1) Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова, Росгидромет, Санкт-Петербург

(2) Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова, РАН, Москва

7. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Ведущие авторы: В. П. Мезешко, В. М. Катков
Авторы: В. А. Говоркова, Е. Д. Надежина, Т. В. Палова, П. В. Спорышев, И. М. Школьник, Б. Е. Шенеров
Рецензент: академик РАН Г. С. Голыгин

Таблица. МОЦАО МГЭИК

Модель (в скобках дано краткое обозначение)	Центр, страна	Описание	Разрешение атмосферного компонента	Разрешение океанского компонента
CCSM2 (CGCM)	США, Канада	Flato and Boer, 2001	T32 (3.8 x 3.8) L10	1.8 x 1.8 L29
CSIRO_mk2 (CSI)	CSIRO, Австралия	Gordon and O'Farrell, 1997	R21 (3.2 x 5.6) L9	3.2 x 5.6 L21
CSM 1.4 (CSM)	NCAR, США	Boville et al., 2001	T42 (2.8 x 2.8) L18	2.0 x 2.4 L45
ECHAM4/OPYC3 (ECH)	MPI, Германия	Roeckner et al., 1996	T42 (2.8 x 2.8) L19	2.8 x 2.8 L11
GFDL_R30_c (GFDL)	GFDL, США	Delworth et al., 2003	R30 (2.25 x 3.75) L14	2.25 x 1.875 L18
HadCM3 (HAD)	UKMO, Великобритания	Gordon et al., 2000	2.5 x 3.75 L19	1.25 x 1.25 L20
PCM (PCM)	NCAR, США	Washington et al., 2000	T42 (2.8 x 2.8) L18	0.67 x 0.67 L32

Последовательность выполнения работ:

1) Рассчитывается ежегодная урожайность в заданном регионе в начале 21го века (например, в период с 2000 до 2015гг) и сравнивается с зарегистрированной по этим же годам на основании имеющихся статистических данных. Устанавливаются параметры линейной корреляции между относительными величинами урожайности в этот же период $Y_{calc}^{2000}/Y_{max_calc}^{2000}$ и $Y_{obs}^{2000}/Y_{max_obs}^{2000}$, где Y_{calc}^{2000} и Y_{obs}^{2000} – величины, соответственно, рассчитанной и зарегистрированной урожайности в этот же период; $Y_{max_calc}^{2000}$ и $Y_{max_obs}^{2000}$ – максимальные величины, соответственно, рассчитанной и зарегистрированной урожайности в этот же период. Сравнение относительных величин $Y_{calc}^{2000}/Y_{max_calc}^{2000}$ и $Y_{obs}^{2000}/Y_{max_obs}^{2000}$ позволяет уменьшить или исключить возможное влияние ряда неучтенных факторов (например, литературных данных по коэффициентам (постоянным величинам), характеризующим особенности развития данной культуры, ее

водопотребления и т.д.; в том числе, по содержанию воды в сельскохозяйственной продукции).

Строится график типа показанного на рис.1.

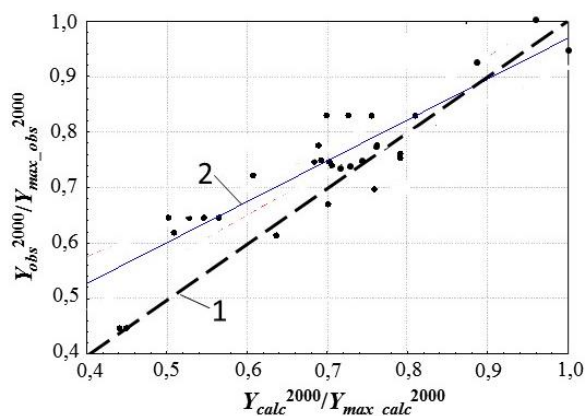


Рис. 1. Пример регрессионной связи между рассчитанными ($Y_{calc}^{2000}/Y_{max_calc}^{2000}$) и реальными ($Y_{obs}^{2000}/Y_{max_obs}^{2000}$) урожайностями в начале 21го века. 1 – линия сравнения $Y_{obs}^{2000}/Y_{max_obs}^{2000} = Y_{calc}^{2000}/Y_{max_calc}^{2000}$; 2 – реальная связь

$$Y_{obs}^{2000}/Y_{max_obs}^{2000} = a + bY_{calc}^{2000}/Y_{max_calc}^{2000}.$$

В случае значительных расхождений между рассчитываемыми (Y_{calc}^{2000}) и наблюдаемыми (Y_{obs}^{2000}) величинами урожайности или их относительными значениями ($Y_{calc}^{2000}/Y_{max_calc}^{2000}$ и $Y_{obs}^{2000}/Y_{max_obs}^{2000}$) необходимо выяснить причину такого расхождения. Часто это связано с неправильным учетом размерностей или величин переменных, используемых при расчете Y_{calc}^{2000} или с неправильной интерпретацией наблюдаемых величин Y_{obs}^{2000} (например, в результате не учёта содержания воды в сельскохозяйственной продукции).

2) Рассчитывается урожайность Y_{calc}^{2100} для середины или конца 21го века по имеющимся прогнозируемым среднемесячным данным об изменении температуры, осадков и солнечной радиации в среднемноголетнем разрезе в эти периоды. Расчет урожайности проводится для различных имеющихся прогнозных изменения климата в зависимости от ожидаемого увеличения содержания CO_2 в атмосфере (от 1,5 до 4 раз) и использованной модели циркуляции атмосферы. Возможен также учет изменения плодородия почвы под влиянием изменения климата.

3) Оценивается ожидаемое относительное изменение урожайности $\delta Y = Y_{calc}^{2100}/Y_{calc}^{2000} - 1$. При этом учитывается характер корреляционной связи $Y_{obs}^{2100}/Y_{max_obs}^{2100} = a + b * Y_{calc}^{2100}/Y_{max_calc}^{2100}$.

4) Выясняется относительное влияние отдельных климатических факторов на изменение урожайности δY .

5) В случае ожидаемого существенного снижения урожайности возможен поиск путей уменьшения величины δY за счет изменения сроков сева или применения методов мелиорации почв.

Расчет урожайности Y_{calc}^{2000} и Y_{calc}^{2100} :

Либо по упрощенной методике ФАО (такой подход может быть иногда использован при подготовке магистерских диссертаций) в зависимости от средних климатических и почвенных условий в вегетационный период конкретного года или в среднемноголетии:

$$Y_{calc} = Y_{pot}^{veg} I_w^{veg} \Phi^{veg} [1/(1 - \gamma)] \quad (1)$$

где Y_{calc} – урожайность сельскохозяйственной культуры, выражаемая в кг/га сырой товарной продукции (для зерновых – при влажности складированной продукции), регистрируемой в статистической отчетности в конкретный год или в среднемноголетии; Y_{pot}^{veg} – потенциальная экономически оправданная урожайность сельскохозяйственной культуры, возможно получаемая в условиях обеспечения растения необходимым количеством влаги и питательных веществ и защиты его от вредителей и болезней, выражаемая в кг/га сухого вещества в зависимости от средневегетационных климатических условий года (или, при необходимости, в среднемноголетии); I_w^{veg} – безразмерный понижающий индекс увлаженности почвы (от 0 до 1) в зависимости от средневегетационных климатических условий года (или, при необходимости, в среднемноголетии); Φ^{veg} – безразмерный понижающий индекс плодородия почвы (от 0 до 1) в слое 0-30 или 0-20 см (в зависимости от имеющейся информации) в среднем за период вегетации года (или, при

необходимости, в среднемноголетии), учитывающий влияние постепенно изменяющегося климата на плодородие почвы; γ – содержание воды в единице массы товарной продукции (для зерновых – влажность складированной продукции), γ – величина безразмерная, изменяющаяся между 0 и 1.

Либо по уточненной методике ФАО (такой подход может быть использован при подготовке кандидатских и докторских диссертаций) в зависимости от среднемесячных климатических и почвенных условий в течение вегетации конкретного года или в среднемноголетии:

$$Y_{calc} = \frac{1}{1-\gamma} \Phi^{veg} \sum_1^n (Y_{pot}^i I_w^i) \quad (2)$$

где Y_{calc} – то же, что и в (1); Y_{pot}^i – часть накопленной за каждый месяц i (или части месяца) в течение вегетационного периода общей продолжительностью n месяцев (с начала появления всходов до уборки урожая) потенциально экономически оправданной полезной биомассы (урожайности) сельскохозяйственной культуры, возможно получаемой в условиях обеспечения растения необходимым количеством влаги и питательных веществ и защиты его от вредителей и болезней, выражаемая в кг/га сухого вещества в зависимости от среднемесячных климатических условий года (или, при необходимости, в среднемноголетии); I_w^i – безразмерный понижающий индекс увлажненности почвы (от 0 до 1) в зависимости от среднемесячных климатических условий года (или, при необходимости, в среднемноголетии). В соответствии с методологическими указаниями ФАО, если в каком-то месяце $i \equiv j$ в течение вегетации индекс увлажненности $I_w^j < 1$ (из-за недостатка или избытка влаги), то в следующие месяцы этот индекс не может быть больше чем I_w^j , то есть, принимается, что, если по расчету I_w^{j+k} , где $k \geq 1$, больше чем I_w^j , то принимается $I_w^{j+k} = I_w^j$ из-за угнетения растения на предыдущем этапе; Φ^{veg} и γ – то же, что и в формуле (1).

Для расчета потенциальной урожайности Y_{pot} (за вегетацию Y_{pot}^{veg} или за месяц

Y_{pot}^i) необходимо знать:

- группу сельскохозяйственной культуры, чтобы определить максимальную интенсивность фотосинтеза P_m
- дату появления всходов
- продолжительность вегетационного периода (от всходов до полного созревания или уборки урожая)
- температуру воздуха по расчетным периодам в течение вегетации
- суммарную солнечную радиацию
- концентрацию CO_2 в атмосфере (эта величина берется из сценариев изменения климата).

Остальные необходимые данные можно получить по прилагаемым таблицам (см. ниже).

Расчет потенциальной урожайности Y_{pot} по эко-физиологической модели ФАО (FAO/PIASA, 2012):

$$Y_{pot}^{veg} = B_m^{veg} H \text{ или по уточненной методике } Y_{pot}^i = B_m^i H \quad (3)$$

где Y_{pot}^{veg} – потенциальная экономически оправданная урожайность сельскохозяйственной культуры, возможно получаемая в условиях обеспечения растения необходимым количеством влаги и питательных веществ и защиты его от вредителей и болезней и выражаемая в кг/га сухого вещества в зависимости от средневегетационных климатических условий года (или, при необходимости, в среднемноголетии); Y_{pot}^i – часть накопленной за каждый месяц в течение вегетационного периода продолжительностью n месяцев (с начала появления всходов до уборки урожая) потенциальной общей биомассы сельскохозяйственной культуры, выражаемой в кг/га сухого вещества в зависимости от среднемесячных климатических условий (или, при необходимости, в среднемноголетии); B_m^{veg} – сухая биомасса растения нетто (кг га⁻¹), накопленная за период вегетации с момента всходов до полного

созревания (или до момента уборки урожая); B_m^i – сухая биомасса растения нетто (кг га⁻¹), накапливаемая за каждый последовательный месяц в течение вегетации длительностью n месяцев с момента появления всходов до полного созревания (или до момента уборки урожая); H – индекс урожая или доля сухого вещества собираемой продукции (урожая) в общей сухой биомассе растения (величина безразмерная в пределах от 0 до 1).

$$B_m^{veg} \text{ или } B_m^i = (0.36b_{gm} \beta K_{CO_2}) / (1/N + 0.25c_t) \quad (4)$$

где b_{gm} – максимальная интенсивность прироста биомассы (кг га⁻¹ сут⁻¹) при максимальной за период относительной площади листьев $LAI = 5$; β – отношение величин b_{gm} при максимальном значении LAI , соответственно, в течение вегетации или в каждом месяце и при $LAI = 5$; β – безразмерная величина (от 0 до 1); N – продолжительность вегетационного периода или каждого месяца (сут). При этом принимается во внимание различное число дней в каждом расчетном месяце в пределах от 1 до 31 с суммой дней за все месяцы равной продолжительности вегетации; K_{CO_2} – коэффициент, учитывающий изменение потенциальной урожайности по отношению к началу 21 века в зависимости от сценария изменения содержания CO_2 в атмосфере в конкретный период 21го века ($K_{CO_2} \geq 1$ – безразмерный). Считается, что K_{CO_2} и содержание CO_2 в атмосфере не изменяется в течение одного десятилетия; c_t – коэффициент (сут⁻¹), зависящий от температуры воздуха T в среднем за вегетацию или за каждый месяц.

$$\beta = 0.3424 + 0.9051 \lg(LAI) \text{ при } LAI < 5 \text{ и } \beta = 1 \text{ при } LAI \geq 5 \quad (5)$$

$$c_t = c_{30} (0.0044 + 0.0019T + 0.001T^2) \quad (6)$$

где T – температура воздуха средняя в рассматриваемый период времени, то есть, в течение вегетации или месяца (°C); c_{30} – величина c_t при $T = 30^\circ\text{C}$; $c_{30} = 0.0283$ для бобовых и 0.0108 для не бобовых культур.

$$b_{gm} = F(0.8 + 0.01 P_m)b_0 + (1 - F)(0.5 + 0.025P_m)b_c \text{ при } P_m > 20 \text{ кг га}^{-1} \text{ час}^{-1} \quad (7)$$

$$b_{gm} = F(0.5 + 0.025 P_m)b_0 + (1 - F)(0.05P_m)b_c \text{ при } P_m < 20 \text{ кг га}^{-1} \text{ час}^{-1} \quad (8)$$

$$F = (A_c - 0.5R_g)/(0.8A_c)$$

где P_m – максимальная интенсивность фотосинтеза листьями растения ($\text{кг га}^{-1} \text{ час}^{-1}$ углеводов $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), которая зависит от температуры воздуха T , типа фотосинтеза растения (C3 или C4); b_0 – интенсивность прироста сухой биомассы брутто сельскохозяйственной культуры в данной местности и конкретном времени года в полностью пасмурный день ($\text{кг га}^{-1} \text{ сут}^{-1}$); b_c – интенсивность прироста брутто биомассы сельскохозяйственной культуры в данной местности и конкретном времени года в полностью ясный (безоблачный) день ($\text{кг га}^{-1} \text{ сут}^{-1}$); величины b_0 и b_c соответствуют $P_m = 20 \text{ кг га}^{-1} \text{ час}^{-1}$; A_c – максимальная активная проходящая коротковолновая солнечная радиация в течение ясного дня ($\text{кал см}^{-2} \text{ сут}^{-1}$); R_g – суммарная радиация ($\text{кал см}^{-2} \text{ сут}^{-1}$). При переходе к другим размерностям радиации используется соотношение $1 \text{ кал см}^{-2} \text{ мин}^{-1} = 697.8 \text{ W м}^{-2}$.

Величина K_{CO_2} определяется по рис. 2.

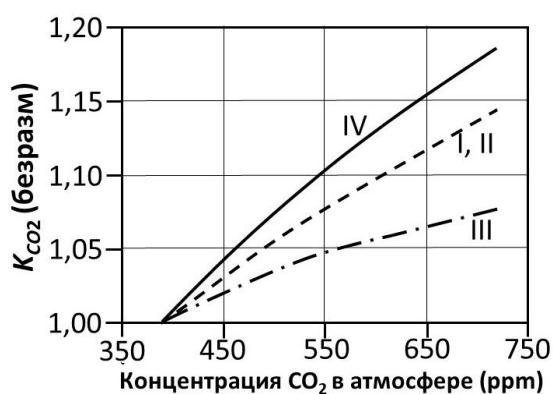


Рис. 2. Зависимость коэффициента K_{CO_2} от концентрации CO_2 в атмосфере. В 2000г. концентрация CO_2 была $370 \text{ ppm} = 0,0037\%$ ($1 \text{ ppm} =$ одна миллионная часть). I – IV – особенности фотосинтеза растений.

Ожидаемое изменение концентрации CO_2 в атмосфере в зависимости от сценариев роста населения планеты и экономического развития, рассматриваемых Межправительственной Комиссией по Изменению Климата

(IPCC), показано в таблице А.

Таблица А. Концентрация CO₂ в атмосфере (ppm) в течение 21го века в работах ФАО по оценке влияния изменения климата на продуктивность сельскохозяйственных угодий, в соответствии со сценариями изменения климата, рассматриваемыми IPCC

Сценарий	Год			
	(период)			
	2005 (2001-2010)	2025 (2011-2040)	2055 (2041-2070)	2085 (2071-2100)
A2	370	430	547	721
B2	370	417	488	568
B1	370	422	494	534
A1b	370	440	547	649
A1f	370	434	594	834

Среднемесячные величины A_c , b_0 и b_c в зависимости от широты местности приведены в таблице 1 приложения. В таблице 2 приложения для различных сельскохозяйственных культур приведена примерная продолжительность вегетации N , тип фотосинтеза, величины H и максимальные за вегетацию LAI в зависимости от уровня интенсивности земледелия, а также P_m в зависимости от температуры воздуха T . В качестве дополнительных к таблице 2 приложения материалов в таблицах 3 и 4 приложения приведены максимальные за вегетацию значения LAI^{veg} для различных типов растительности типичные для различных климатических зон, а также средние величины продолжительности вегетации и сроков сева в Центральной черноземной зоне России и суммы эффективных среднесуточных температур воздуха, необходимых для полного вызревания сельскохозяйственной культуры.

Для получения величин LAI максимальных для отдельных месяцев в течение вегетации можно использовать таблицу 5 приложения, в которой приводится распределение относительной площади листьев LAI/LAI^{veg} различных растений в зависимости от относительного времени N/N^{veg} в течение вегетации.

Данные по R_g имеются среди метеоданных или могут быть рассчитаны в зависимости от температуры воздуха (для этого существует отдельная методика).

С учетом (3) формулы (1) и (2) для расчета Y_{calc}^{2000} и Y_{calc}^{2100} можно переписать в следующем виде:

$$Y_{calc} = B_m^{veg} I_w^{veg} \Phi^{veg} [H/(1 - \gamma)] \quad (1a)$$

$$Y_{calc} = \frac{H}{1-\gamma} \Phi^{veg} \sum_1^n (Y_{pot}^i I_w^i) \quad (2a)$$

Расчет индекса увлажненности почвы I_w^{veg} или I_w^i

Этот индекс безразмерный, изменяется в пределах от 0 до 1 и может определяться по месяцам (I_w^i) или в среднем за вегетацию (I_w^{veg}).

Влияние водного режима территории на урожайность достаточно хорошо изучено в России, в том числе, на кафедре мелиорации и рекультивации земель РГАУ. В России I_w^{veg} или I_w^i , как правило, определяется по методу водного баланса активной части корнеобитаемого слоя.

Тем не менее, по-видимому, имеет смысл описать подходы к расчету индекса увлажненности I_w^{veg} , применяемые ФАО.

В ФАО этот индекс определяется:

Вариант I. В зависимости от интенсивности реальной эвапотранспирации ET_a^{pl} (при существующей в данный период времени влажности почвы) в сравнении с ее потенциальной величиной ET_0^{pl} .

или

Вариант II. В зависимости от влагозапасов в активном корнеобитаемом слое

почвы мощностью z_r в течение каждого месяца в процессе развития растения по сравнению с оптимальными для данной культуры их значением (подобный подход часто используется в России).

Очевидно, что в обоих подходах необходимо знать величину влажности почвы θ для определения реальной эвапотранспирации ET_a^{pl} .

Вариант I.

Индекс увлажнения почвы определяется следующим образом:

$$I_w^{veg} \text{ или } I_w^i = 1 - k^y \left(1 - \frac{ET_a^{pl}}{ET_0^{pl}} \right) \quad (9)$$

k^y – коэффициент чувствительности с/х культуры к недостатку или избытку почвенной влаги (таблица 6 приложения); ET_a^{pl} – реальная эвапотранспирация данной с/х культуры при известной влажности почвы; ET_0^{pl} – потенциальная эвапотранспирация данной с/х культуры при оптимальной влажности почвы.

ET_0^{pl} определяется следующим образом:

$$ET_0^{pl} = k^c ET_0 \quad (10)$$

ET_0 – испаряемость с травяной растительности (обычно это трава типа райграс или овсяница высотой 8-15 см или люцерна высотой 30-70 см); k^c – переходный коэффициент для определения потенциальной эвапотранспирации с/х культуры по эвапотранспирации с травяной растительности, зависящий от фазы развития растения (таблица 7 приложения).

Величина ET_a^{pl} и отношение ET_a^{pl}/ET_0^{pl} зависят от влажности почвы θ (рис.3).

На рис. 3 показаны характерные графики изменения реальной эвапотранспирации сельскохозяйственных культур в зависимости от влажности почвы.

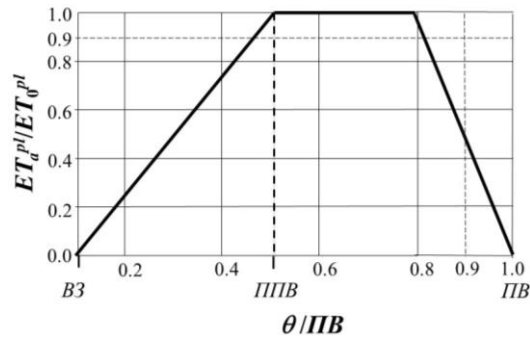


Рис. 3. Характерный график изменения реальной эвапотранспирации сельскохозяйственных культур в долях от потенциальной эвапотранспирации (ET_d^{pl}/ET_0^{pl}) в зависимости от влажности почвы в долях от полной влагоемкости ($\theta/ПВ$) в активном корнеобитаемом слое почвы мощностью z_r .

Зависимость отношения ET_d^{pl}/ET_0^{pl} от влажности θ в активном корнеобитаемом слое почвы мощностью z_r можно выразить следующим образом:

$$(ET_d^{pl}/ET_0^{pl}) = (\theta - BЗ)/(ППВ - BЗ) \quad \text{при } \theta \leq ППВ,$$

$$(ET_d^{pl}/ET_0^{pl}) = 1 \quad \text{при } ППВ \leq \theta \leq 0,8ПВ \quad (11)$$

$$(ET_d^{pl}/ET_0^{pl}) = (1 - \theta/ПВ)/(0,2ПВ) \quad \text{при } 0,8ПВ \leq \theta \leq 1,0ПВ$$

Здесь θ – объемная влажность почвы, изменяемая в пределах от 0.1 до 0.6 в минеральных и до 0.95 в торфяных почвах; $ППВ$ – предельная полевая влагоемкость почвы; $BЗ$ – влажность завядания; $ПВ$ – полная влагоемкость равная $П - (0,05 \div 0,10)$, где $П$ – пористость почвы; $0,05 \div 0,10$ – содержание заземленного воздуха в почве при ее избыточной влажности (в долях от объема почвы). На рис. 4 показаны характерные для различных по текстуре минеральных почв значения $BЗ$ и $ППВ$.

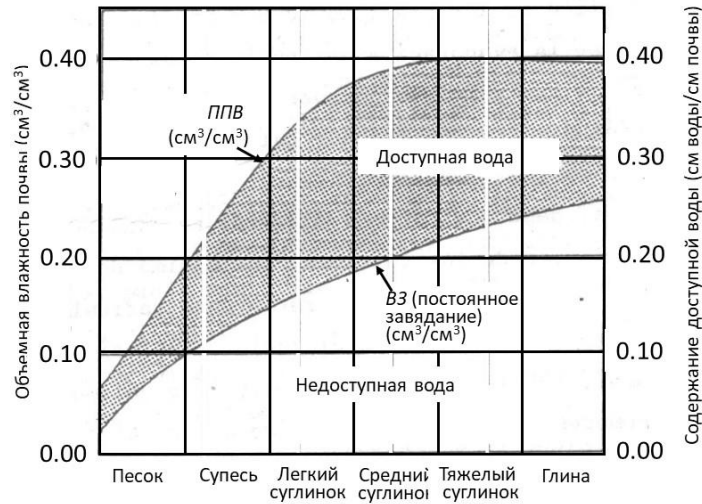


Рис. 4. Изменение почвенных характеристик $VЗ$ и $ППВ$ и содержания доступной воды в минеральных почвах в зависимости от их текстуры (Boyer and Kramer, 1995).

Величину влажности почвы θ в активном корнеобитаемом слое почвы мощностью z_r можно найти из уравнения водного баланса этого слоя в среднем за вегетацию или в течение каждого ее месяца i :

$$(\theta_{fin} - \theta_{mic}) z_r = Pr + Ir - ET_d^{pl}(\theta) - (OUT^{sup} - IN^{sup}) \pm q \quad (12)$$

где θ_{fin} и θ_{mic} — соответственно, конечная и начальная в месяце i безразмерная объемная влажность активного слоя почвы глубиной z_r (мм или см); $\theta = (\theta_{mic} + \theta_{fin})/2$; Pr и Ir — осадки и слой оросительной воды за месяц i (мм или см); ET_d^{pl} — реальная эвапотранспирация растения, зависящая от влажности почвы (мм или см); OUT^{sup} и IN^{sup} — сток и приток поверхностной воды (мм или см); q — подпитывание со стороны грунтовых вод активного слоя почвы (+) или сток воды из активного слоя в грунтовые воды (-)(мм или см).

При Ir за вегетацию равной нулю рассматривается случай богарного земледелия, при $Ir > 0$ — случай орошаемого земледелия. В зависимости от уровня доступности водных ресурсов для орошения в начале 21го века принимается решение о возможном изменении оросительной нормы Ir за

вегетацию и ее распределения по месяцам в результате глобального изменения климата. При отсутствии ограничений водных ресурсов оросительная норма Ir^{2100} может быть увеличена по сравнению с Ir^{2000} при увеличении потенциальной эвапотранспирации ET_0^{pl} пропорционально росту потребности в воде $(ET_0^{pl\ 2100})/(ET_0^{pl\ 2000})$. При ограниченных водных ресурсах оросительная норма Ir может быть сохранена ($Ir^{2100} = Ir^{2000}$) или уменьшена пропорционально ожидаемому ослаблению источника орошения ($Ir^{2100} < Ir^{2000}$).

Обычно в расчетах ФАО величинами $(OUT^{sup} - IN^{sup})$ и q пренебрегают и полагают их примерно равными нулю. В действительности, при глубоком залегании грунтовых вод (примерно, более 3 м) имеет место частичная потеря воды ($-q$) в результате стока в глубокие слои профиля почвы за пределы корнеобитаемой зоны. Эта потеря зависит от технологии орошения и влагопроводности почвы (песчаные почвы теряют больше, чем глинистые). Примерные величины $-q$ в долях от оросительной нормы Ir в зависимости от технологии орошения таковы:

- Самотечное орошение $-q/Ir = 0.20-0.35$
- Орошение дождеванием $-q/Ir = 0.10-0.20$
- Капельное и микродождевание $-q/Ir = 0.01-0.05$

При близком залегании грунтовых вод (в основном, в гумидных районах) имеет место капиллярное подпитывание со стороны грунтовых вод $+q$, величину которого приблизительно можно оценить в зависимости от текстуры почвы и глубины расположения уровня грунтовых вод h_a по формуле СФ Аверьянова:

$$+q = ET_0^{pl} [1 - (h_a/h_0)]^\lambda \quad (13)$$

где ET_0^{pl} – потенциальная эвапотранспирация сельскохозяйственной культуры; h_0 – так называемая «критическая» глубина, больше которой не наблюдается капиллярное подпитывание; λ – показатель степени. В таблице Б приведены значения h_0 и λ в зависимости от текстуры почвы.

Таблица Б. Значения h_0 и λ в формуле (13)

Текстура почвы	h_0 (м)	λ (безразм.)
Песчаная	1	3
Суглинистая	2	2
Глинистая	3	1

В зонах избыточного увлажнения России возможный дополнительный приток поверхностных вод IN^{sup} , как правило, устраняется инженерными гидромелиоративными приемами ($IN^{sup} = 0$), а поверхностный сток воды с территории поля, наоборот организуется. Поэтому в уравнении (12) необходимо знать величины OUT^{sup} или уточненные величины эффективных осадков ($Pr - OUT^{sup}$) на начало и в течение 21го века. По-видимому, в прогнозных оценках водного режима в середине и конце 21го века можно сохранить величину отношения $(1 - OUT^{sup}/ Pr)$ полученного для начала 21го века:

$$(OUT^{sup})^{2100} \cong Pr^{2100}(OUT^{sup}/ Pr)^{2000} \quad (14)$$

По поводу месячных Ir^i или за вегетацию Ir^{veg} оросительных норм в середине и конце 21го века следует высказать такое соображение. При практическом отсутствии ограничений на водозабор оросительная норма Ir^{veg} и ее части Ir^i должны быть изменены пропорционально ожидаемому изменению потенциальной эвапотранспирации сх культуры ET_0^{pl} , то есть:

$$Ir^{2100} = Ir^{2000} [(ET_0^{pl})^{2100}/(ET_0^{pl})^{2000}] \quad (15)$$

Почвенно-гидрологические характеристики $BЗ$, $ППВ$ и пористости почв $П$ для минеральных и торфяных почв можно найти в справочниках по почвоведению, сельскохозяйственным мелиорациям земель, а также в других источниках литературы.

Величина $ПВ$ оценивается примерно следующим образом: $ПВ = П - 0.05$ для

песчаных и супесчаных почв, $PВ = П - 0.10$ для суглинистых и глинистых почв ($П$ – пористость почв; она изменяется в пределах от 0.30-0.35 в песчаных до 0.50-0.60 в глинистых почвах).

Глубина активного корнеобитаемого слоя почвы z_r (речь, прежде всего, идет о распространении микроскопических корневых волосков, которые поглощают воду, питательные вещества и участвуют в дыхательном процессе корней) зависит от:

- вида с/х культуры,
- механических характеристик почвенного профиля (препятствует ли он проникновению корней при наличии каменистых включений или плотных прослоек),
- глубины расположения уровня грунтовых вод (при глубине менее 1 - 1.5 м грунтовые могут ограничить глубину распространения корней)

Характер распределения массы корней по почвенному профилю зависит также от характера распределения питательных веществ (прежде всего гумуса и азота). Обычно основная часть корневой массы находится в верхнем слое глубиной 0.20-0.50 м, где содержится основное количество гумуса и органического и минерального азота; но искусственно можно изменить характер распределения по глубине питательных веществ и, соответственно, корневой системы.

Как правило, под активным корнеобитаемым слоем почвы глубиной z_r подразумевается слой почвы, в котором расположено 75% корневой массы. Величины z_r найти в справочниках по агрономии, агрометеорологии, агрохимии, мелиорации сельскохозяйственных земель и т.д. В таблице 8 приложения приведены значения z_r для некоторых с/х культур в наиболее характерных условиях с однородным почвенным профилем и глубоким расположением уровня грунтовых вод. Здесь же приведены значения активной

корнеобитаемой зоны, рекомендуемой для различных фенологических этапов развития растений.

В ФАО с учетом принятых допущений, что $(OUT^{sup} - IN^{sup}) = 0$, $q = 0$, уравнение (12), как правило, используется в виде:

$$\theta_{fin}^i = \theta_{inic}^i z_r + (1/z_r)(Pr + Ir - ET_d^{pl}) \quad (16)$$

где i – номер месяца, θ_{inic}^i и θ_{fin}^i – начальная и конечная, соответственно, в месяце i влажность почвы в активном слое почвы глубиной z_r . Очевидно, что конечная влажность почвы в предыдущий месяц есть начальная влажность в следующем месяце.

Счет начинается примерно за один месяц (или декаду, в зависимости от выбранных интервалов времени) до посева в период положительных среднесуточных температур воздуха.

Для этого месяца $i - 1$ или $i = 0$ принимается $\theta_{inic}^{i-1} = \theta_{inic}^{i=0} = ППВ$ или $ПВ$ и $(ET_d^{pl})^{i=0} = (ET_{\theta}^{pl})^{i=0}$ в гумидных и полугумидных зонах в зависимости от их климатических особенностей региона, от того, имеется ли промерзшая почва и слой снега на поверхности, а также в зависимости от глубины уровня грунтовых вод в расчетный период. Рассчитывается $\theta_{fin}^{i=0}$ на конец первого промежутка времени.

Если получается, что $ППВ \leq \theta_{fin}^{i=0} \leq 0.8ПВ$, то для следующего месяца принимается $(ET_d^{pl})^i = (ET_{\theta}^{pl})^i$ и $\theta_{inic}^i = \theta_{fin}^{i-1}$. Если получается $\theta_{fin}^{i=0} < ППВ$, то по формуле (11) определяется соответствующая ей интенсивность эвапотранспирации $(ET_d^{pl})^i$ и эта величина участвует в водном балансе следующего месяца i . Если получается $\theta_{fin}^{i=0} > 0.8ПВ$, то по формуле (11) определяется соответствующая ей интенсивность эвапотранспирации $(ET_d^{pl})^i$ и эта величина участвует в водном балансе следующего месяца $i+1$.

В аридных и полуаридных зонах принимается условие $\theta_{inic}^{i-1} = \theta_{inic}^{i=0} = ВЗ$ и $(ET_d^{pl})^{i=0} = 0$. При проведении предпосевных поливов принимается условие θ_{inic}^{i-1}

$$1 = \theta_{mic}^{i=0} = ППВ \text{ и } (ET_d^{pl})^{i=0} = (ET_d^{pl})^{i=0} = (ET_0^{pl})^{i=0}.$$

Если получается, что $\theta_{fin}^{i=0} < BЗ$, то принимается $\theta_{fin}^{i=0} = BЗ$ и $(ET_d^{pl})^{i=0} = 0$. Затем рассчитывается $\theta_{fin}^{i=1}$ и $(ET_d^{pl})^{i=1}$ на конец месяца $i=1$ и определяется среднеарифметическое значение $(ET_d^{pl})^{i=1}$ между соответствующими $\theta_{mic}^{i=1}$ и $\theta_{fin}^{i=1}$. Значение $(ET_d^{pl})^{i=1}$ используется для определения индекса увлажнения $I_w^{i=1}$ в первом месяце $i=1$.

Затем повторяется процесс оценки θ и ET_d^{pl} в следующем месяце $i = 2$, потом в месяце $i = 3$, $i = 4$ и т.д. Каждый раз величина, например, $\theta_{fin}^{i=1}$ и соответствующая $(ET_d^{pl})^{i=1}$ используются в уравнении водного баланса (17) как $\theta_{mic}^{i=2}$ и соответствующая $(ET_d^{pl})^{i=2}$, чтобы подсчитать $\theta_{fin}^{i=1}$ и соответствующую $(ET_d^{pl})^{i=2}$. Потом определяется среднеарифметическая величина $(ET_d^{pl})^{i=2}$ и вычисляется величина индекса увлажнения $I_w^{i=2}$, а затем повторяется этот процесс для месяца $i = 3$ и т.д.

Как было отмечено выше, в соответствии с методологией ФАО, индекс увлажнения не может быть больше, чем в предыдущем месяце из-за пережитого тогда необратимого стресса в результате недостатка воды. То-есть, если по расчету получается, что $I_w^{i+1} > I_w^i$, то следует принять $I_w^{i+1} = I_w^i$. И если $I_w^{i+1} < I_w^i$, то принимается величина I_w^{i+1} .

Вариант II

Методология варианта II была разработана для регионов с безморозным теплым климатом, в основном, для богарного земледелия, где влажность почвы не может длительное время быть выше ППВ. При орошении эта методология предусматривает, что $I_w^n = 1$ при достатке воды для орошения и возможно $I_w^n \leq 1$ при ее недостатке.

Ниже рассматривается случай богарного земледелия. При рассмотрении случая орошаемого земледелия к осадкам по месяцам i или их частям надо добавлять слой подаваемой в данный период оросительной воды Iri .

Индекс увлажненности почвы I_w^i рассматривается как отношение потенциального недостатка влагозапаса почвы DEF_i в течение периода i , чтобы обеспечить потенциальную эвапотранспирацию, к величине потенциальной эвапотранспирации растения за весь период вегетации $(ET_0^{pl})^{veg}$:

$$I_w^i = I_w^{i-1} + DEF_i / (ET_0^{pl})^{veg} \quad (17)$$

где I_w^{i-1} – индекс увлажненности в предыдущем месяце $i - 1$. Чтобы подсчитать индекс увлажненности $I_w^{i=1}$ в первый месяц вегетации $i-1$ или $i=1$ предлагается начинать с предыдущего (до посева) виртуального месяца (или его части) $i - 1$ или $i=0$. В этом месяце $i=0$ предлагается принимать $I_w^{i=0} = 1$ для зон гумидных и полугумидных, но может быть также и для аридных и полуаридных, если до посева даются поливы. В аридных и полуаридных условиях без поливов до посева принимается условие $I_w^{i=0} = 0$.

Недостаток влагозапаса почвы DEF_i подсчитывается таким образом:

$$DEF_i = Pr_i - (ET_0^{pl})_i + RS_{i-1} - RS_i \quad (18)$$

где Pr_i и $(ET_0^{pl})_i$ – осадки и потенциальная эвапотранспирация растения в период i ; RS_{i-1} и RS_i – доступные растению влагозапасы в активном корнеобитаемом слое почвы глубиной z_r в конце предыдущего $i-1$ и, соответственно, начале последующего периода i :

$$RS_{i-1} = (\theta_{i-1} - BЗ)z_r \text{ и } RS_i = (\theta_i - BЗ)z_r \quad (19)$$

где θ_{i-1} и θ_i – объемная влажность активного корнеобитаемого слоя почвы в периоды времени $i-1$ и i ; $BЗ$ – влажность завядания (постоянная, указанная на рис. 4); z_r – глубина активного корнеобитаемого слоя почвы (таблица 9 приложения).

Максимальный влагозапас RS_{max} это:

$$RS_{max} = (ППВ - PM)z_r \quad (20)$$

где $ППВ$ – предельная полевая влагоемкость (рис. 4).

Подставляя (19) в (18) получаем:

$$DEF_i = Pr_i - (ET_0^{pl})_i + (\theta_{i-1} - BЗ - \theta_i + BЗ) z_r = Pr_i - (ET_0^{pl})_i + (\theta_{i-1} - \theta_i) z_r \quad (21)$$

где z_r имеет размерность такую же, как Pr_i и $(ET_0^{pl})_i$.

Индекс увлажнения в каждый период рассчитывается по формуле (16) или выраженной так:

$$I_w^i = I_w^{i-1} + (DEF_i)/(ET_0^{pl})^{veg} \quad (22)$$

где $(I_w^n)_{i-1}$ и $(I_w^n)_i$ – индексы увлажнения, накопленные к месяцам $i-1$ и i ; DEF_i – потенциальный недостаток влагозапаса почвы в период i ; DEF_i может быть отрицательным в случае дефицита воды и положительным при ее избытке; $(ET_0^{pl})^{veg}$ – потенциальная эвапотранспирация культуры за весь период вегетации: $(ET_0^{pl})^{veg} = \sum_{i=1}^n (ET_0^{pl})_i$, n – число месяцев (или их частей) в течение вегетации (от всходов до уборки урожая).

Для удобства расчетов ФАО предлагает начинать расчет водного баланса с предыдущего посева виртуального месяца $i-1$ или $i=0$, в конце которого полагать, как было сказано выше, что $\theta_{i-1} = \theta_{i=0} = BЗ$ или $RS_{i-1} = RS_{i=0} = 0$ в аридных и полуаридных условиях без полива перед посевом и $\theta_{i-1} = \theta_{i=0} = ППВ$ о $RS_{i-1} = RS_{i=0} = RS_{max}$ в гумидных и полугумидных условиях и возможно даже в аридных и полуаридных, если до посева производится полив.

В случае рассмотрения целого периода вегетации (без его разбиения на месяцы, декада и тд) индекс увлажнения I_w^{veg} рассчитывается по формуле (9), где для расчета $(ET_a^{pl})^{veg}$ необходимо учитывать влажность активного корнеобитаемого слоя почвы среднюю за период вегетации θ_m . Величину $(ET_a^{pl})^{veg}$ можно вычислить с помощью уравнения водного баланса за период вегетации в общем виде для богарных и орошаемых земель:

$$\theta_{fin} = \theta_{i=0} - (1/z_r)[(ET_0^{pl})^{veg} - Pr^{veg} - Ir^{veg}] \quad (23)$$

где $\theta_{i=0} = BЗ$ или $ППВ$ в зависимости от климатической; $(ET_0^{pl})^{veg}$, Pr^{veg} и Ir^{veg} –

соответственно, величины потенциальной эвапотранспирации, осадков и оросительной нормы; в богарных условиях $I_r^{veg} = 0$; z_r имеет размерность такую же, как $(ET_0^{pl})^{veg}$, Pr^{veg} и I_r^{veg} .

Если в уравнении (25) $\theta_{fin} > ППВ$, то следует принять $\theta_{fin} = ППВ$; если $\theta_{fin} < ВЗ$, то следует принять $\theta_{fin} = ВЗ$. Величина средней за вегетацию влажности почвы $\theta_m = (\theta_{i=0} + \theta_{fin})/2$.

Ниже в таблице В показан пример расчета индекса увлажненности I_w^i территории в богарных условиях, расположенной в полуаридной зоне

Таблица В. Пример расчета индекса увлажненности I_w^i

Декада	Pr_i (мм)	$(ET_0)_i$ (мм)	k_i^c (безразм.)	$(ET_0^{pl})_i$ (мм)	$(Pr - ET_0^{pl})_i$ (мм)	$ET_0^{pl})_i$ (мм)	$DEF_i = (Pr - ET_0^{pl})_i + RS_{i-1} - RS_i$	$(DEF_i / \sum ET_0^{pl})^{veg}$	$I_w^i = \frac{DEF_i}{\sum ET_0^{pl})^{veg}}$
$Pr^{veg} = 420$ мм; $(\sum ET_0^{pl})^{veg} = 334$ мм; $RS_{max} = 60$ мм ($z_r = 300-400$ мм); $RS_{min} = 0$ мм									
0						0			
1	30	61	0.3	18	12	12	0		1.0 0
2	26	59	0.4	23	3	15	0		1.0 0
3	5	57	0.6	34	-29	0	-29+15-0=- 14	-14/334=- 0.042	0.9 6
4	129	55	0.7	38	91	60	91+0- 60=31	+31/334=+ 0.093	0.9 6
5	98	52	0.8	41	57	60	57+60- 60=57	+57/334=+ 0.171	0.9 6

6	74	51	1.0	51	23	60	23+60- 60=23	+23/334=+ 0.069	0.9 6
7	8	50	1.0	50	-42	18	-42+60- 18=0	0	0.9 6
8	42	49	1.0	49	-7	11	-7+18- 11=0	0	0.9 6
9	8	52	0.5	26	-18	0	-18+11-0=- 7	-7/334=- 0.021	0.9 4

Примечание: 1. Здесь рассмотрен случай богарного земледелия в полуаридных условиях. Поэтому принято $RS_i = 0$; 2. $RS_{max} = (IIIВ - ВЗ) z_r$; $RS_{min} = (ВЗ - ВЗ) z_r = 0$; 3. Учтено, что величина I_w^i не может быть больше, чем в предыдущем периоде из-за пережитого растением необратимого стресса в результате недостатка воды

Величина ET_0^{pl} рассчитывается по имеющимся методикам. ФАО рекомендует использовать метод Пенмана-Монтейта (Penman-Monteith), считающийся эталонным в Северной и Южной Америке, в Западной Европе, Африке и в большинстве стран юго-восточной Азии, Корее, Японии, Австралии и др., а при недостатке исходной информации упрощенные методы Торнтвейта (Tornthwaite), Харгрейвса (Hargreaves), Хэмон (Hamon). В России применяются, в основном, другие методы.

Известно, что чем длиннее период времени, тем точнее расчет эвапотранспирации и тем больше выбор формул для ее расчета. Для оценки влияния глобального изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур эвапотранспирация рассчитывается по месячным промежуткам времени от посева до уборки урожая сельскохозяйственной культуры. Для таких промежутков времени можно использовать упрощенные методы расчета испаряемости с травяной растительности ET_0 .

Важно при выборе метода расчета ET_0^{pl} или ET_0 учитывать региональный опыт результатов сравнения по нему расчетных месячных значений ET_0^{pl} или ET_0 с экспериментальными данными, а также то, что прогнозы глобального изменения климата дают оценки изменения только месячных величин температуры, осадков и солнечной радиации (суммарной или радиационного баланса или поступающей на поверхность атмосферы внеземной радиации). Поэтому, выбирая сравнительно простой метод, основанный на использовании прежде всего месячных величин температуры воздуха или солнечной радиации, необходимо его проверять по данным об эвапотранспирации, измеренной или рассчитанной по более точным методам (но более сложным) на начало 21го века, и вводить поправочные коэффициенты для каждого месяца вегетации (или части месяца) в простой метод для получения достаточной сходимости с потенциальной эвапотранспирацией, измеренной или рассчитанной по более точным методам. Затем расчеты ET_0^{pl} или ET_0 с применением простого метода, но с установленными поправочными коэффициентами проводятся для середины или конца 21го века.

Методы расчета ET_0 , применяемые ФАО:

Метод Пенмана-Монтейта (Allen, Pereira, Raes, Smith, 1998)

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.3u_2)} \quad (24)$$

где ET_0 – испаряемость с травяной растительности (мм сут⁻¹); при расчете за декаду или несколько дней надо суммировать суточные значения ET_0 , а при использовании осредненных за период суточных переменных в формуле (24) надо умножить ET_0 на количество дней в расчетном периоде времени; R_n – радиационный баланс на поверхности растений (МДж м⁻² сут⁻¹); G – плотность

теплового потока в почве ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$); T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м ($^{\circ}\text{C}$); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м (м с^{-1}); e_s – давление насыщенного пара (кПа); e_a – фактическое давление (кПа); $(e_s - e_a)$ – дефицит давления пара (кПа); Δ – градиент кривой давления пара ($\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ – психрометрическая постоянная ($\text{кПа } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Величины $\gamma(z)$ для различных высот z указаны в источнике (Allen, Pereira, Raes, Smith, 1998) в табл. 2.2 на стр. 214; $e_a = e^0(T_{min})$ рассчитывается по уравнению (48) на стр. 56 и в табл. 2.3 на стр. 215; $\Delta = \Delta(T)$ в табл. 2.4 на стр. 216; при отсутствии данных наблюдений за R_n и G метод их определения по данным наблюдений за температурой воздуха также описывается в этом источнике литературы.

Метод Пенмана-Монтейта считается наиболее совершенным и широко применяется во многих странах мира (в Северной и Южной Америке, Западной Европе, Африке, Австралии, Японии и некоторых других регионах).

Более простые методы расчета ET_0 таковы:

Метод Харгрейвса (Hargreaves)

$$ET_0 = 0.023R_a(T + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (25)$$

где ET_0 в мм/сут в среднем за рассматриваемый период; T_{max} и T_{min} – среднемесячные величины максимальной и минимальной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$); T – среднемесячная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$): $T = (T_{max} + T_{min})/2$; R_a – среднемесячная внеземная солнечная радиация (на верхней границе атмосферы ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$)). В таблице 9 даны величины R_a для северного полушария в начале 21го века. В интернете есть подобные данные также для южного полушария.

Метод Харгрейвса дает удовлетворительную сходимость с расчетами ET_0 по формуле Пенмана-Монтейта. Уравнение (25) имеет тенденцию к занижению

ET_0 при высокой скорости ветра (примерно, больше 3 м/сек) и к завышению при высокой влажности воздуха (Alkaeed et al, 2006; Xui and Singh, 2002).

К сожалению, определенную сложность может вызвать нахождение величин T_{max} и T_{min} в климатических прогнозах глобального изменения климата в 21м веке.

Метод Блэйни-Криддла

$$ET_0 = k p (0.46T + 8.13) \quad (26)$$

где ET_0 в мм за выбранный период (например, за месяц); p – процентное соотношение между количеством дневных часов в течение выбранного периода и в целом за год; k – коэффициент потребления воды в зависимости от растения, географического расположения территории и месяца в течение вегетации. k изменяется в пределах от 0.5 для апельсиновых деревьев до 1.2 для плотной естественной растительности.

Величины p в зависимости от месяца и широты местности приведены в таблице 10 приложения.

Как и в предыдущем случае этот метод тоже дает удовлетворительную сходимость с расчетами ET_0 по формуле Пенмана-Монтейта (Alkaeed et al, 2006; Xui and Singh, 2002).

Метод Торнтвейта (Thorntwaite), основанный на данных наблюдений только за температурой воздуха:

$$ET_0 = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \left(\frac{\tau}{12} \right) \left(\frac{1}{30} \right) \quad (27)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (28)$$

где ET_0 в мм/сут в среднем за рассматриваемый период; T – среднемесячная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); τ – продолжительность светлого времени суток в

среднем за данный месяц (час). Величины τ в зависимости от месяца и широты местности приведены в таблице 10 приложения.

К сожалению, метод Торнтвейта менее точен, чем Харгрейвса. Он завышает ET_0 в теплые месяцы и занижает в холодные. Однако в среднем за вегетационный период он дает достаточно надежные результаты расчета ET_0 .

Для улучшения точности расчетов ET_0 по месяцам можно найти поправочные коэффициенты к месячным значениям эвапотранспирации, рассчитанным по методу Торнтвейта для прогнозных периодов изменения климата в течение 21го века. Такие поправочные коэффициенты можно получить путем установления корреляционных связей между не вызывающими сомнения месячными значениями ET_0 в начале 21го века (рассчитанными по более надежным формулам или полученными в экспериментах) и рассчитанными по методу Торнтвейта.

Определение ET_0 по данным об испарении с водной поверхности

Здесь можно сослаться на работу (Постников, 2012) или другие публикации гидрологов и гидрометеорологов России.

В США гидрометеорологическая служба установила переходные коэффициенты K_p для пересчета величин испарения $E_{вод}$ с водной поверхности эвапориметров диаметром 120 см на величину испаряемости с травяной растительности ET_0 (Allen, Pereira, Raes, Smith, 1998).

При этом различают особенности покрова окружающей эвапориметры поверхности (рис. 5).

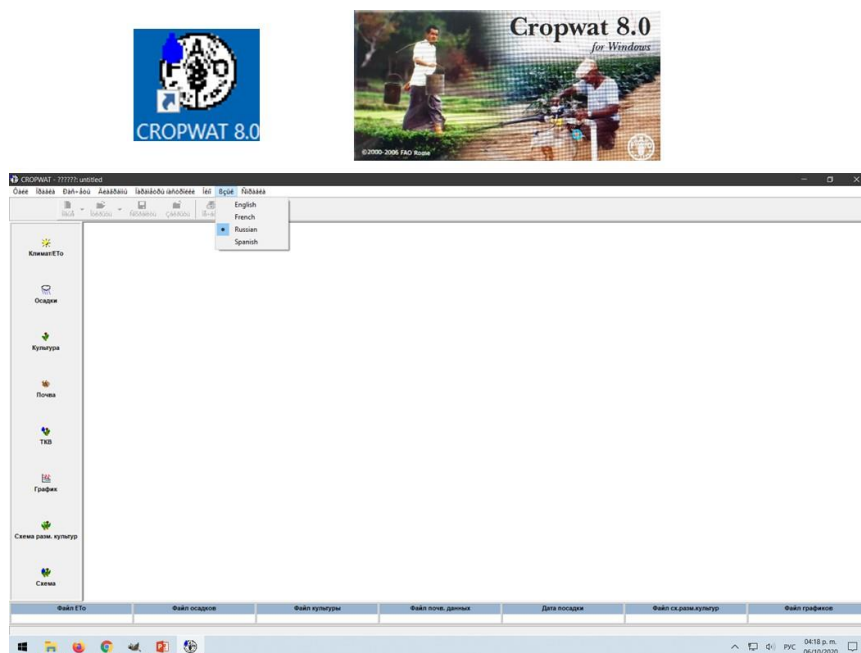


Рис. 5. Два случая установки эвапориметров и их окружения

В таблице 11 приложения приведены величины поправочных коэффициентов K_p .

Возможность упрощения расчетов с помощью существующих компьютерных программ

Некоторые операции по прогнозу изменения продуктивности можно упростить, используя пакет программ ФАО под названием CROPWAT на английском, французском, испанском и русском языках (<https://cropwat.informer.com/8.0/>).



Определение индекса плодородия почвы и его изменения в зависимости от глобального изменения климата

Индекс плодородия почвы Φ^{veg} (безразмерный и изменяющийся от 0 до 1) в слое 0-30 или 0-20 см (это зависит от имеющейся информации) в среднем за период вегетации отдельных лет или, при необходимости, в среднемноголетии рассчитывается в зависимости от содержания питательных веществ в почве или в зависимости от бонитета почвы (или территории). Для расчетов урожайности, не связанных прямо с влиянием глобального изменения климата, индекс плодородия можно учитывать и по отдельным месяцам i в течение

вегетационных периодов отдельных лет. В этом случае индекс плодородия почвы Φ^i должен находиться внутри суммы в формуле (2).

Индекс Φ в зависимости от содержания в почве питательных веществ можно рассчитать по формулам (Пегов, Хомяков, 1991):

С учетом доз вносимых удобрений:

В среднем за вегетацию:

$$\Phi^{veg} = 0.32 \frac{(G_s + \alpha D_{org})^{veg}}{(G_s + \alpha D_{org})^{max}} + 0.42 \sqrt[3]{\frac{N_s + \varepsilon_N N_f}{(N_s + \varepsilon_N N_f)^{max}} \frac{P_s + \varepsilon_P P_f}{(P_s + \varepsilon_P P_f)^{max}} \frac{K_s + \varepsilon_K K_f}{(K_s + \varepsilon_K K_f)^{max}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH_s - 6}{2}\right)^2} \quad (29)$$

где G_s – содержание гумуса (суммы гуматной и фульватной его формы) в почве (т/га); D_{org} – среднегодовая доза внесения органического удобрения (навоз, сидераты и др.) (т/га); α – доля органического удобрения, переходящая в гумус (безразмерн.); $(G_s + \alpha D_{org})^{max}$ – максимальное содержание гумуса в почве, с учетом органических удобрений (т/га). Эта величина устанавливается в зависимости от имеющихся данных. При рассмотрении конкретного участка в конкретный год, по рекомендации авторов (Пегов, Хомяков, 1991), принимается величина 600 т/га. При рассмотрении нескольких лет или сравнении нескольких участков принимается максимальная величина $(G_s + \alpha D_{org})^{max}$ за несколько лет и разных участков. Это можно делать, учитывая, что целью расчетов является оценка относительного изменения урожайности по годам (или среднегодовой в различные периоды 21го столетия) или/и по участкам; N_s , P_s и K_s – содержание в почве доступных растениям форм (не общее – валовое содержание) элементов минерального питания растений: азота (сумма нитратной и аммонийной форм азота) (т/га); N_f , P_f и K_f – среднегодовые дозы азотных, фосфорных и калийных удобрений (т/га); ε_N , ε_P и ε_K – эффективность использования этих удобрений растениями, отражающих долю доступных и поглощаемых растениями форм удобрений и учитывающая

форму вносимых минеральных удобрений, кислотность или щелочность почвенного раствора (безразмерную величину pH_s), а также потерю удобрений в результате их возможного поверхностного стока, просачивания с водой по профилю почвы ниже корнеобитаемого слоя и газообразную потерю в атмосферу нитратной и аммонийной форм азота почвы (безразм.); $(N_s + \varepsilon_N N_f)^{max}$, $(P_s + \varepsilon_P P_f)^{max}$ и $(K_s + \varepsilon_K K_f)^{max}$ – максимальное содержание в почве доступных растениям форм минерального питания среднегодовое с учетом вносимых минеральных удобрений (т/га). Эти величины определяются по статистическим данным, характерным для региона, в котором расположен анализируемый участок. При рассмотрении нескольких лет или сравнении нескольких участков принимаются максимальные эти величина за несколько лет и разных участков.

В книге (Пегов, Хомяков, 1991) вместо pH_s указана гидролитическая кислотность почвы H_s в мг-экв/100 г. Показатель степени в экспоненте вместо $\left(\frac{pH_s-6}{2}\right)^2$ записан так: $-\frac{|H_s-1|}{4}$.

При отсутствии данных о H_s можно использовать приближенное соотношение:

$$\frac{|H_s-1|}{4} \cong \left(\frac{pH_s-6}{2}\right)^2 \quad (30)$$

При наличии информации о составе гумуса авторы Пегов и Хомяков (1991) величину G_s в формуле (29) предлагают более точно выражать не как общее содержание гумуса, а так:

$$G_s = G_{hum} + 0.2G_{fulv} \quad (31)$$

где G_{hum} и G_{fulv} – раздельное содержание, соответственно, гуматных и фульватных кислот в гумусе (т/га).

Примечание: В принципе, в формуле (2) можно рассмотреть индекс плодородия почвы Φ^i за отдельные месяцы или их части в течение периода вегетации:

Здесь применяется формула аналогичная (29), в которой содержание гумуса, элементов минерального питания и pH_s почвы те же, что и в формуле (29), характерные для целого года или в среднем за многолетие, а дозы удобрений распределяются по характерным периодам года с учетом примерных сроков (месяцы или декады) и доз внесения удобрений.

Величины $(G_s + \alpha D_{org})^{max}$, $(N_s + \varepsilon_N N_f)^{max}$, $(P_s + \varepsilon_P P_f)^{max}$ и $(K_s + \varepsilon_K K_f)^{max}$ – те же, что и в формуле (29).

Без учета доз вносимых удобрений:

В среднем за вегетацию Φ^{veg} определяется по формуле, аналогичной (31), где дозы органических и минеральных удобрений не учитываются и условно считаются в числителе и знаменателе этой формулы равными нулю:

$$\Phi^{veg} = 0.32 \frac{G_s}{G_s^{max}} + 0.42 \sqrt[3]{\frac{N_s}{N_s^{max}} \frac{P_s}{P_s^{max}} \frac{K_s}{K_s^{max}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH_s - 6}{2}\right)^2} \quad (32)$$

где G_s , N_s , P_s и K_s – среднее за вегетацию или месяц содержание в почве, соответственно, гумуса и доступных растениям форм азота, фосфора и калия (т/га); G_s^{max} – максимальное содержание гумуса в почве (т/га). Эта величина устанавливается в зависимости от имеющихся данных. При отсутствии данных и рассмотрении одного года, по рекомендации авторов (Пегов, Хомяков, 1991), можно принять $G_s^{max} = 600$ т/га. При рассмотрении нескольких лет или сравнении нескольких участков принимается максимальная величина G_s^{max} за несколько лет и разных участков. Это можно делать, учитывая, что целью расчетов является оценка относительного изменения урожайности по годам (или среднегодовой в различные периоды 21го столетия) или/и по участкам; N_s , P_s и K_s – то же, что и в формуле (31); N_s^{max} , P_s^{max} и K_s^{max} – максимальное содержание в почве доступных растениям форм минерального питания (т/га). Эти величины определяются по статистическим данным, характерным для региона, в котором расположен анализируемый участок. При рассмотрении

нескольких лет или сравнении нескольких участков принимаются максимальные эти величина за несколько лет и разных участков.

При отсутствии данных о содержании доступных форм азота (не путать с валовым содержанием азота) формулу (29) можно упростить, учитывая, что основное количество потребляемого растениями азота приходится на азот, получаемый в процессе разложения гумуса (аммонификация и затем нитрификация). В этом случае формула (20) записывается следующим образом:

$$\Phi^{veg} = 0.46 \frac{G_s}{G_s^{max}} + 0.28 \sqrt{\frac{P_s}{P_s^{max}} \frac{K_s}{K_s^{max}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH_s - 6}{2}\right)^2} \quad (33)$$

где весовой коэффициент содержания элементов минерального питания уменьшен и увеличен весовой коэффициент содержания гумуса в почве.

Принимая во внимание, что при оценке влияния глобального изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур необходимо учесть возможное изменение плодородия почвы под влиянием изменяющегося климата при сохранении технологии земледелия начала 21го века (в том числе, сортов и севооборота растений, технологии и режима внесения удобрений и т.д.), необходимо рассматривать среднеголетний индекс плодородия за период вегетации (точнее, за год) Φ^{veg} и рассчитывать его по формулам (32) или (33) в зависимости от имеющейся информации.

Для прогноза изменения урожайности под влиянием изменяющегося климата ФАО рекомендует рассматривать индекс Φ^{veg} в среднем за многолетие в каждом из анализируемых периодов 21го столетия без учета изменения технологии и вида сельскохозяйственного использования земель, в том числе, доз и технологии внесения удобрений. Такой подход позволяет оценивать влияние изменяющегося климата в долгосрочной перспективе на относительное изменение плодородия региональных целинных почв, геоморфологически подобных почвам исследуемой сельскохозяйственной

территории, и использовать его при оценке влияние изменяющегося климата на плодородие почвы исследуемой сельскохозяйственной территории.

Методика бонитировочной оценки сельскохозяйственных земель достаточно хорошо описана в публикации (Почвенный институт им. Докучаева, 2003). Результаты такой оценки отражены в имеющихся статистических данных. Бонитет почвы изменяется от 0 до 1 (или от 0 до 100%). Он оценивает не только агрохимические свойства самих почв, но размеры и форму земельных участков, степень эродированности их поверхности, наличие камней, кустарников или других помех для ведения сельского хозяйства. Примерная шкала сравнения такова: более 70% – это наиболее пригодные земли; 46 - 70% – пригодные; 21 - 45% – малопригодные; менее 20% – не пригодные. Для оценки бонитета почв используются, как правило, три основных агрохимических свойства: содержание и состав гумуса, наличие и доступность элементов минерального питания и кислотности-щелочности почв. Учитывается также мощность гумусового слоя, емкость поглощения, степень насыщенности основаниями, текстура (или механический состав) почвы, засоленность и окультуренность почвы.

Оценка индекса Φ^{es} не представляет особой трудности для начала 21го века. Проблема заключается в оценке его изменения в конце или середине 21го века под влиянием изменяющегося климата. К сожалению, эта проблема до сих пор не решена.

Существующие математические модели формирования почв и изменения их плодородия во времени, такие как APEX, DSSAT, SWAT, EPIC, а также описанные в публикациях типа (Bryant, Arnold, 1994) не позволяют прогнозировать процессы формирования почв под воздействием изменения климата в течение длительных промежутков времени, измеряемых десятилетиями и столетиями. Они пригодны для более коротких промежутков времен, измеряемых годами. Поэтому, как правило, в моделях ФАО,

описывающих изменение продуктивности сельскохозяйственных угодий под влиянием изменения климата в 21м веке, фактор возможного изменения плодородия почв под влиянием того же изменения климата не учитывается.

В последние годы была разработана методика приближенной оценки возможного изменения плодородия почв под влиянием изменения климата в 21м веке и применена на практике (Nikolskii et al., 2006; Castillo-Alvares et al., 2007; Nikolskii et al., 2010; Terrazas-Mendoza et al., 2010; Lucke et al., 2010; Brigido et al., 2015; Aidarov and Nikolskii, 2016).

Суть этой методики заключается в следующем (*Примечание: идея такой методики возникла на основании работ И.П. Айдарова, который впервые установил зависимость некоторых региональных агрохимических свойств суходольных почв Европейской части России и Центральной Азии от регионального радиационного индекса сухости Будыко в начале 21го века*)

В соответствии с Законом Географической Зональности Почв, открытого Докучаевым (1889) и развитого затем Jenny (1941), Григорьевым (1954) и Волобуевым (1974), основные агрохимические и агрофизические свойства целинных, не используемых в сельском хозяйстве почв (и потому не модифицированных), отвечающий за их плодородие, зависят от:

- зональных особенностей климата,
- рельефа (точнее, от местоположения на рельефе местности и уклона территории),
- почвообразующей породы,
- вида растительности,
- продолжительности почвообразования.

Учитывая, что распространение естественной растительности на региональном уровне (а более точно, на зональном уровне) зависит от зональных особенностей климата, то появляется возможность устанавливать зависимость

интегрального индекса плодородия целинных почв от регионального климатического индекса.

Отсюда, если сравнивать зональные основные свойства целинных почв, отвечающие за интегральный индекс их плодородия (32) или (33) внутри геоморфологически однородных групп с близкими по минералогическому составу почвообразующими породами, с одинаковой продолжительностью почвообразования, и расположенные на участках с одинаковыми уклонами местности, то, по-видимому, можно установить количественную графическую связь между модальными свойствами этих свойств и региональным среднегодовым климатическим индексом. Волобуев (1973, 1974) показал, что в качестве такого климатического индекса можно использовать радиационный индекс сухости Будыко I_{Rn} (1956):

$$I_{Rn} = R_n / (\lambda Pr) \quad (34)$$

где I_{Rn} – безразмерная величина, изменяющаяся в пределах от 0.4 до 8 и больше (значения менее 1-1.5 соответствуют полугумидным и гумидным условиям; более 1-1.5 – полуаридным и аридным условиям); R_n – радиационный баланс (КДж/см²/год); $\lambda = 2.51$ КДж/см²/мм – скрытая теплота испарения; Pr – осадки (мм/год).

Величины R_n и Pr отражают роль, соответственно, солнечной радиации и воды (осадков) в формировании почв: в микробиологических, физико-химических, биохимических и гидро-физических процессах почвообразования. В работе Волобуева (1974) количественно описана роль этих факторов в почвообразовательных процессах.

Более точно количество воды, участвующей в процессе почвообразования, зависит от типа водного питания территории и баланса поверхностных и почвенных вод. Поэтому I_{Rn} может в общем виде быть выражен следующим образом (в мм/год):

$$I_{Rn} = R_n / [\lambda (Pr + IN^{sup} - OUT^{sup} + q\uparrow)] \quad (35)$$

где IN^{sup} – возможное дополнительное поступление воды в почву в результате притока поверхностных вод при аллювиальных или делювиальных процессах; OUT^{sup} – сток поверхностных вод с территории; $q\uparrow$ – возможное подпитывание со стороны близко расположенных грунтовых вод.

В каждом конкретном случае желательно анализировать структуру водного баланса поверхностных и почвенных вод. Часто для больших по размеру территорий, измеряемых квадратными километрами и имеющими уклоны менее 1% применима формула (35).

Известно, что чем более мощный почвенный покров, тем меньше сказывается влияние почвообразующей породы на плодородие почвы. Прежде всего это касается минеральных почв. Поэтому, процесс отбора данных о свойствах целинных почв внутри геоморфологически однородных групп упрощается, если мощность почвенного покрова более 0.5-1.0 м и если выбираются участки местности с уклонами менее 1%.

Методика установления количественной связи некоторых свойств целинных почв от климатического индекса I_{Rn} описана в работах (Никольский и др., 2006 и 2010) и состоит в следующем.

С помощью инструментов ГИС (Географической Информационной Системы) последовательно анализируется комплект цифровых карт (есть опыт использования карт масштаба 1:50000 с помощью программ ArcInfo 8.01 и ArcView 3.2). Схема анализа показана на рис. 6.

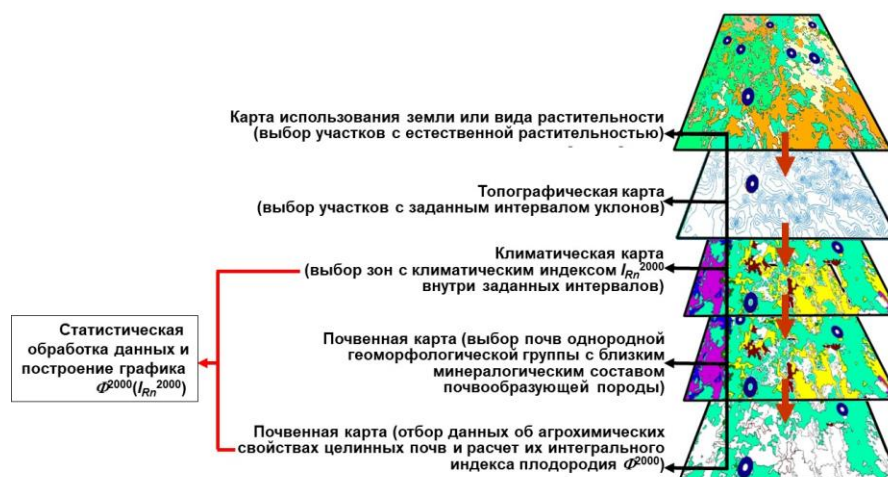


Рис. 6. Схема построения зависимости интегрального индекса плодородия целинной почвы Φ^{2000} в начале 21го века от среднемноголетнего климатического индекса I_{Rn}^{2000} .

1. Выбираются территории с естественной растительностью в различных климатических зонах страны, но желательно с одинаковым типом климата (например, континентальный для европейской части России).
2. Среди отобранных территорий выбираются участки с заданными уклонами. Прежде всего, речь идет о малоуклонных участках (с уклонами менее 3%) для исключения фактора водной эрозии.
3. Для этих участков выписываются среднемноголетние климатические данные на начало 21го века и по ним по формуле (34) рассчитывается климатический индекс $I_{Rn} = I_{Rn}^{2000}$.
4. На этих же участках анализируются имеющиеся данные и типах и свойствах целинных почв (не используемых в сельском хозяйстве), включая описание почвенного профиля. Отбираются участки с почвами одной и той же геоморфологической группы и с близким минералогическим составом почвообразующей породы. В случае почв мощностью более 1 м, как правило, влияние почвообразующей породы практически не заметно и может быть игнорировано.
5. Для отобранных участков с целинными почвами, принадлежащими одинаковой геоморфологической группе, выписываются их

агрохимические свойства для пахотного слоя 0-20 см для точек с известными координатами. Это прежде всего свойства, характеризующие интегральный индекс плодородия $\Phi^{veg\ 2000} = \Phi^{2000}$, и по формулам (32) или (33) рассчитывается этот индекс.

6. Затем по каждой группе участков, расположенных в зонах с примерно одинаковыми значениями индекса I_{Rn}^{2000} , точнее внутри одинаковых интервалов его изменения: примерно с интервалом 0,25 или 0,5 в зависимости от наличия данных о свойствах почв, группируются свойства целинных почв и соответствующий им интегральный индекс плодородия $\Phi^{veg\ 2000}$. Предполагается, что интервал изменения I_{Rn}^{2000} сравнительно мал и поэтому внутри него можно пренебречь влиянием климата на свойства почв. То-есть, «точечные» свойства почв внутри заданного интервала изменения I_{Rn}^{2000} можно рассматривать как совокупность случайных величин, не зависящих от I_{Rn}^{2000} .
7. Внутри каждого интервала I_{Rn}^{2000} эти «точечные» свойства почв и соответствующие им значения интегрального индекса плодородия нормируются путем их деления на среднеарифметическое значение каждого свойства и индекса плодородия. Проводится статистический анализ характера распределения нормированных «точечных» значений свойств и индекса плодородия почв (симметричное или асимметричное). И определяются среднеарифметические (для симметричного распределения) или модальные (для асимметричного распределения) их значения и доверительные интервалы распределения в каждом из выделенных интервалов изменения климатического индекса I_{Rn}^{2000} .
8. По этим данным с помощью Нуамс (2017), Excel или другими способами строится график зависимости среднеарифметических или модальных региональных значений индекса плодородия целинных почв Φ^{2000} от климатического индекса I_{Rn}^{2000} для геоморфологически однородных групп почв больших территорий страны с одинаковым

типом климата.

Учитывая достаточно медленное изменение климата (происходящее в течение века) и сравнительно быструю реакцию этих свойств на климатические изменения (таблица С), можно предположить, что характер этих зависимостей, установленный в начале века, сохранится до его конца. Поэтому такие графики можно использовать для прогнозирования изменения индекса плодородия целинных (а затем, и сельскохозяйственных) почв в зависимости от сценариев климатических изменений. При прогнозировании изменения плодородия сельскохозяйственных почв под влиянием изменения климата предполагается сохранение сельскохозяйственных технологий выращивания сельскохозяйственной культуры.

В качестве первого приближения можно воспользоваться результатами работ, выполненных ранее.

Для автоморфных почв, расположенных на сравнительно равнинных территориях с уклонами менее 3% построены графики зависимости некоторых агрохимических свойств почв от среднегодового климатического индекса I_{Rn} для европейской части России и Центральной Азии (Айдаров, 1985) и для Мексики (Никольский и др., 2002; Никольский и др., 2010; Nikolskii-Gavrilov et al., 2014). Также имеются подобные графики для пойменных земель Нечерноземной зоны европейской части России (Никольский, 1987). По этим графикам можно по формуле (34) рассчитать интегральный индекс плодородия целинных почв в пределах одной и той же геоморфологической группы.

Следует отметить, что сравнение данных по годовым суммам радиационного баланса R_n для территории Северной и Южной Америки, полученным по мировому атласу Будыко (1963) и измеренным на метеостанциях Мексики (а также США и Аргентины), показало, что мексиканские данные о R_n больше примерно в 1.5 раза, чем указанные в атласе Будыко. По-видимому, это связано с различием методик определения R_n . Поэтому сделанный выше комментарий

о распределении климатических зон в зависимости от величины климатического индекса I_{Rn} следует, к сожалению, читать так: в России значения I_{Rn} менее 1 соответствуют полугумидным и гумидным условиям (а в Мексике менее 1.5); более 1 – полуаридным и аридным условиям (а в Мексике более 1.5).

На рис. 7, 8 и 9 показаны графики $\Phi(I_{Rn})$ для целинных автоморфных суходольных почв европейской части России и Центральной Азии, а также для пойменных земель нечерноземной зоны и части степной зоны европейской части России и для низинных торфяных почв европейской части России. Величина Φ рассчитывалась по упрощенной формуле (35), а I_{Rn} по формуле (34).

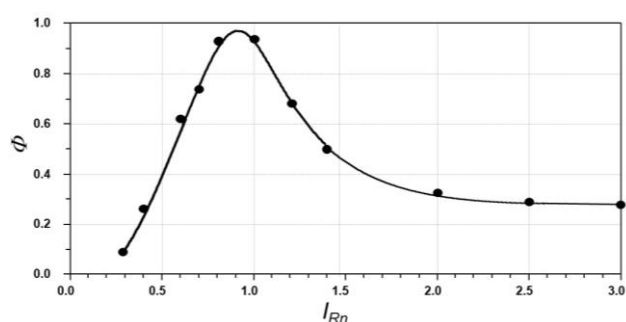


Рис. 7. Зависимость регионального среднего многолетнего интегрального индекса плодородия $\Phi = \Phi^{2000}$ целинных минеральных автоморфных сформированных *in situ* почв, расположенных на равнинных территориях Европейской части России и Центральной Азии с уклонами менее 3%, от среднего многолетнего радиационного индекса сухости I_{Rn} в начале 21го века [построено по работам (Айдаров, 1985; Никольский, 1987; Aidarov and Nikolskii, 2016)]. Почвы – мощностью более 0.5 м. Примерные величины I_{Rn} для различных климатических зон Европейской части России и Центральной Азии таковы: 0.3-0.8 – нечерноземная зона избыточного увлажнения, 0.8-1.1 – черноземная зона умеренного увлажнения, 1.1-1.8 – сухостепная зона, 1.8-3.0 – пустынная зона.

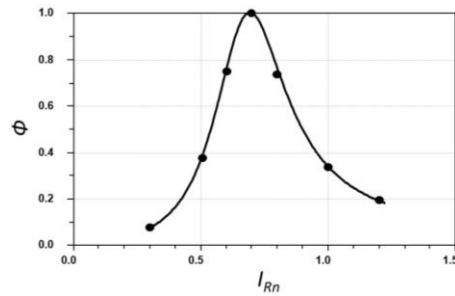


Рис.8. Зависимость регионального среднегогодового интегрального индекса плодородия $\Phi = \Phi^{2000}$ целинных минеральных аллювиальных почв с уклонами менее 3% в Европейской части России от среднегогодового климатического индекса I_{Rn} в начале 21го века [построено по работам (Никольский, 1987)].

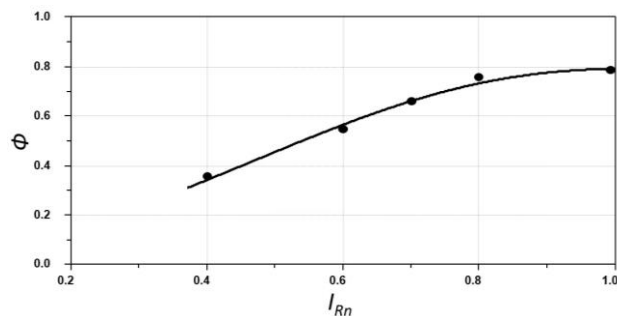


Рис. 9. Зависимость регионального среднегогодового интегрального индекса плодородия $\Phi = \Phi^{2000}$ неосвоенных низинных торфяных почв в Европейской части России от среднегогодового радиационного индекса сухости I_{Rn} в начале 21го века [построено по работе (Никольский, 1987)].

Интересно отметить, что если учесть указанное выше различие в оценках годовых сумм R_n в России и Мексике и совместить графики зависимости относительного содержания гумуса G_s/G_s^{max} в слое 0-20 см целинных почв от климатического индекса I_{Rn} , где российские величины I_{Rn} условно увеличены в 1.5 раза, то обнаруживается подобие в характере распределения G_s/G_s^{max} в зависимости от I_{Rn} на двух континентах, что, возможно, говорит об универсальном характере зависимостей свойств φ и интегрального индекса плодородия Φ от I_{Rn} . На рис. 10 показан такой график.

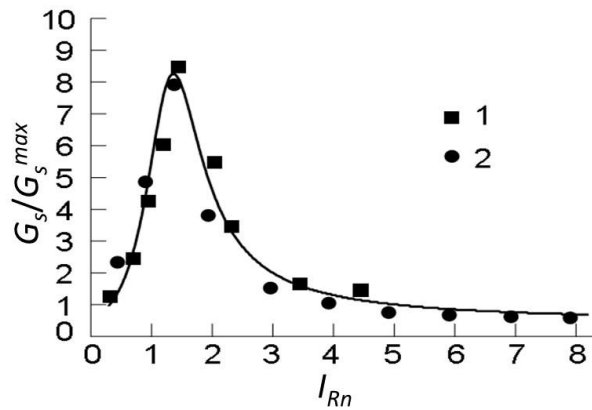


Рис. 10. Сравнение характера распределения среднемноголетнего регионального относительного содержания гумуса G_s/G_s^{max} в слое 0-20 см целинных почв от среднемноголетнего климатического индекса I_{Rn} в случае условного увеличения российских величин I_{Rn} в 1.5 раза.

Указанные на рисунках 7-10 графики $\Phi(I_{Rn})$ отражают в количественной форме Закон Географической Зональности Почв. Точки на графиках соответствуют модальным значениям Φ . К сожалению, на этих графиках не показаны доверительные интервалы изменения индекса плодородия в различных климатических зонах. Эти графики нуждаются в дальнейших уточнениях путем статистической обработки исходных данных по величинам Φ при различных I_{Rn} .

Однако эти графики в первом приближении можно использовать для оценки изменения интегрального индекса плодородия почв сельскохозяйственных угодий под влиянием глобального изменения климата в 21м веке. Обоснованием этого служат следующие соображения:

1. Существование Закона Географической Зональности Почв подразумевает, что постепенное и сравнительно медленное изменение климата должно сопровождаться сохранением связей $\Phi(I_{Rn})$, показанных на рис. 5-7 в течение 21го века.
2. Поэтому изменение среднемноголетнего климатического индекса I_{Rn} под влиянием изменения климата должно приводить к изменению индекса

плодородия Φ на региональном уровне в соответствии с характером графика $\Phi(I_{Rn})$.

3. Степень ожидаемого изменения индекса плодородия почвы на конкретном участке под влиянием только глобального изменения климата (не путать с влиянием сельскохозяйственной деятельности на плодородие почв) должна соответствовать степени изменения плодородия целинных почв на региональном уровне. Более конкретно, такая методика описана ниже.

Доказательством возможности сохранения графиков зависимости в течение 21го века при глобальном изменении климата служит публикация по глобальному изменению почв (Arnold, Szabolcs, Targulian, 1990), где указаны порядки лет, необходимых для изменения того или иного свойства почвы. Эти данные приведены ниже в таблице С.

Таблица С. Продолжительность изменения некоторых свойств почв
(Arnold, Szabolcs, Targulian, 1990)

Продолжительность изменения свойств почв (годы)	Свойства почв
$< 10^{-1}$	Плотность Пористость Газовый состав почвенного воздуха
$10^{-1} - 10^0$	Коэффициент фильтрации Пределная полевая влагоемкость pH Химический состав почвенного раствора Доступность растениям элементов минерального питания
$10^0 - 10^1$	Содержание гумуса Емкость поглощения Состав обменных катионов

	Влажность завядания
$10^1 - 10^2$	Ассоциация минералов глины Удельная поверхность почвы
$10^2 - 10^3$	Химический состав минералов
$> 10^3$	Текстура Гранулометрический состав Плотность минеральных частиц

В соответствии с этими данными основные компоненты интегрального индекса плодородия почв (32) или (33): G_s , N_s , P_s , K_s и pH должны приходить в новое равновесие с измененным климатом не более, чем в течение десятков лет. Поэтому можно ожидать, что графики $\Phi(I_{Rn})$, показанные на рисунках 7-10 сохранятся и в конце 21го века.

Тогда, если, например, климатический индекс на сельскохозяйственном участке «а» (или на выделенной более крупной площади) с индексом плодородия Φ_a^{2000} в течение 21го века изменился с $(I_{Rn})_a^{2000}$ в начале века до известной по прогнозам его величины $(I_{Rn})_a^{2100}$ в конце века, то по графику $\Phi(I_{Rn})$, схематически показанному на рис. 11, относительное изменение регионального индекса плодородия равно $(\Phi^{2100} - \Phi^{2000})/\Phi^{2000} = (\Phi^{2100}/\Phi^{2000}) - 1$. Это соотношение может быть как положительным, так и отрицательным или равно нулю.

В такой же пропорции должен измениться и локальный индекс плодородия выбранной сельскохозяйственной территории:

$$(\Phi^{veg})^{2100} = (\Phi^{veg})^{2000} (\Phi^{2100}/\Phi^{2000}) \quad (35)$$

где $(\Phi^{veg})^{2100}$ и $(\Phi^{veg})^{2000}$ – среднегодовые индексы плодородия почвы выбранной сельскохозяйственной территории, соответственно, в течение и в

начале 21го века; Φ^{2100} и Φ^{2000} – среднегодовые региональные индексы плодородия целинной почвы, соответственно, в течение и начале 21го века.

Индекс плодородия почвы выбранной сельскохозяйственной территории (Φ^{es})²⁰⁰⁰ в начале 21го века определяется по формулам (32) или (33) в зависимости от имеющейся информации по данным почвенной съемки непосредственно на территории или группе территорий, где имеется информация об среднемноголетней урожайности выбранной сельскохозяйственной культуры в начале этого века. Величины Φ^{2100} и Φ^{2000} для региональных целинных почв, определяются по графикам на рисунках 7-9 в зависимости от климатического индекса I_{Rn} , определенного по метеоданным для выбранной сельскохозяйственной территории, для которой имеются данные о свойствах почв и урожайности на начало века, а также прогноз изменения климата в течение 21го века.

Схематическое изображение оценки изменения регионального среднемноголетнего индекса плодородия целинных почв в течение 21го века с Φ^{2000} до Φ^{2100} при изменении климатического индекса с $(I_{Rn})_a^{2000}$ до $(I_{Rn})_a^{2100}$ показано на рис. 11.

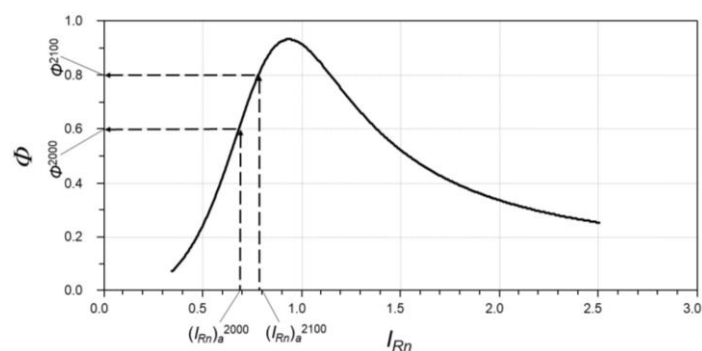


Рис. 11. Схематическое изображение оценки изменения регионального среднемноголетнего индекса плодородия целинных почв в течение 21го века с Φ^{2000} до Φ^{2100} при изменении климатического индекса с $(I_{Rn})_a^{2000}$ до $(I_{Rn})_a^{2100}$.

Подобный подход можно применять не только к концу века (2100), но и к более коротким промежуткам времени в течение 21го века: к середине его (2050) и третьей его четверти (2075).

Итак, с учетом приведенных выше пояснений, формула для расчета урожайности может быть записана в виде:

$$Y_{calc} = \frac{1}{1-\gamma} \Phi^{veg} HK_{CO2} \sum_1^n (B_m^i I_w^i) \quad (36)$$

$$B_m^i = (0.36b_{gm} \beta)/(1/N + 0.25c_t) \quad (37)$$

где остальные обозначения те же, что и выше.

По этим формулам можно оценить не только ожидаемое относительное изменение урожайности в результате глобального изменения климата, но и роль изменения температуры воздуха, осадков и изменения плодородия почв под влиянием изменяющегося климата в общем изменении продуктивности сельскохозяйственных угодий.

Ожидаемые результаты

В результате расчетов Y_{2100}^{calc} или в какой-то период в будущем получается таблица оценки ожидаемого изменения продуктивности ΔY и ее компонентов ΔY_{pot} , I_w , Φ по сравнению с настоящим периодом и выясняется, почему произошли эти изменения. В случае ожидаемого снижения продуктивности предлагаются и обосновываются возможные пути предупреждения потерь продуктивности.

Анализируемая территория	Модель климата	Ожидаемое изменение климата			ΔY_{pot} (%)	$\Delta \Phi$ (%)	ΔI_w (%)	ΔY^{calc} (%)
		ΔRg (%)	ΔT (%)	ΔPr (%)				
Сельскохозяйственная культура								
1	GFDL-R30	-2.0	8.8	27.4	25.7	-15.2	0.0	6.6
	CCC	-0.2	14.2	-17.0	27.3	7.6	0.0	37.0
2	GFDL-R30	-2.5	14.4	28.0	21.0	15.3	19.4	66.5
	CCC	2.7	11.1	-24.9	26.2	-20.3	-28.9	-28.6
3	GFDL-R30	-2.7	14.1	26.7	19.8	5.4	4.0	31.3
	CCC	-0.4	12.6	-13.2	21.1	-10.8	-20.0	-13.6
4	GFDL-R30	-4.2	11.6	28.9	13.3	-6.7	0.0	5.8
	CCC	-1.9	10.2	-14.6	16.3	-1.3	0.0	14.8
5	GFDL-R30	-2.2	13.3	27.0	19.0	13.6	17.5	58.9
	CCC	0.6	10.7	-16.9	22.6	-15.9	-21.8	-19.4
6	GFDL-R30	0.0	25.3	-16.1	26.0	-16.1	-1.0	4.6
	CCC	0.0	23.4	-24.9	26.7	-19.4	-8.3	-6.3

Примерные темы исследований для получения степени магистра, ктн или дтн:

- 1. Оценка влияния глобального изменения климата на урожайность сельскохозяйственной культуры ... в ... регионе (Такая работа может быть выполнена с учетом или без учета изменения плодородия почв на уровне магистра при использовании средневегетационных показателей климата или на уровне ктн и даже дтн (при анализе ряда культур или целого региона) при использовании среднемесячных показателей климата).*
- 2. Обоснование метода определения суммарного испарения для оценки влияния глобального изменения климата на урожайность сельскохозяйственной культуры ... в ... регионе.*
- 3. Установление зависимости между региональными значениями интегрального индекса плодородия целинных почв и среднемноголетним климатическим индексом в пределах геоморфологически однородных групп почв (такая работа требует сбора, систематизации с применением средств ГИС и статистической обработки данных, и в зависимости от ее детальности может быть выполнена на уровне магистра или ктн).*
- 4. Возможны и другие темы исследований по данной проблеме, например, связанные со сравнением различных моделей прогноза климата при оценке влияния на продуктивность земледелия.*

Рекомендуемая последовательность организации исследований:

Для реализации исследований по данной проблеме необходимы данные по климату сейчас и в будущем, урожайностям, почвам, топографии и т.д.

Поэтому прежде всего работу надо направить на сбор и систематизацию данных. По-видимому, это лучше бы делать на уровне магистерских работ. По мере накопления данных, на кафедре будет формироваться банк данных. Этот банк данных значительно упростит и ускорит в дальнейшем выполнение различных работ по данной проблеме.

Так как набор и систематизацию указанных данных необходимо привязывать к конкретным территориям с известными координатами, то такую работу желательно поручать магистратам или аспирантам со знанием программ Географической Информационной Системы (ГИС). Еще лучше, если эти специалисты знали бы основы статистической обработки данных (компьютерные программы).

Литература:

- Айдаров И.П. 1985. Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель. Агропромиздат, М., 304 с.
- Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности, Л., 1956.
- Будыко М.И. 1963. Атлас теплового баланса земного шара. Изд. Межведомственного геофизического комитета, М.-Л.
- Волобуев В.Р. 1973. Система почв мира. Изд. Элм, Баку, 290 с.
- Волобуев В.Р. 1974. Введение в энергетику почвообразования. Изд. Наука, М., 128 с.
- Докучаев В.В. 1889. Избранные сочинения. М., 1889.
- Григорьев А.А. 1954. Некоторые закономерности географической зональности. Изв. АН СССР, сер. географ., №5: 5-7.
- Григорьев А.А., Будыко М.И. 1956. О периодическом законе географической зональности. Докл. АН СССР, т. 110, № 1: 129—132.
- Никольский Ю.Н. 1987. Направленность почвенных процессов при мелиорации в Нечерноземье. Гидротехника и Мелиорация. №7: 20-24.
- Никольский Ю.Н., Контрерас-Бенитес А., Бахлаева О.С., Ордас-Чапarro В. 2002. Оценка изменений свойств почв в зависимости от гидротермических условий на сельскохозяйственных угодьях (на примере Мексики). Почвоведение, № 10: 1165-1170.
- Никольский Ю.Н., Кастильо-Алварес М., Бахлаева О.С., Роман-Кайерос Х.А., Маслов Б.С. 2006. Влияние возможных климатических изменений на свойства почв (на примере Мексики). Почвоведение, №11: 1293-1299.

- Никольский Ю.Н., Кастильо-Алварес М., Бахлаева О.С., Гама-Кастро Х., Ландерос-Санчес С. 2010. Учет влияния возможных глобальных климатических изменений на плодородие почв Мексики при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур. Почвоведение, №9: 1060-1068.
- Пегов С.А., Хомяков П.М. 1991. Моделирование развития экологических систем. Л.: Гидрометеиздат, 223 с.
- Постников А.Н. 2012. Приближенный метод оценки испарения с озер и водохранилищ. Уч. Записки РГГМУ (Российского Государственного Гидрометеорологического Университета), № 13: 21-29.
- Почвенный институт им. Докучаева. 2003. Методика бонитировки почв. Изд. Почвенного института, М.
- Столяров А.И., Гитник А.П. 1986. Методические указания по расчету климатически обеспеченного действительно возможного урожая с конкретного поля при разработке систем земледелия колхозов и совхозов. Изд. МСХ РСФСР, М., 33 с.
- Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н., Карманов И.И., Ефремов В.В. 1991. Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. Агропромиздат, М., 304 с.
- Шумова Н.А. 2017. Методические подходы к оценке относительной площади листьев растений агроценозов. Экосистемы: экология и динамика, том 1, № 1, с.74-92. (ИВП РАН) (<http://www.ecosystemsdynamic.ru/>)
- Aidarov I. and I. Nikolskii. 2016. Modeling and its application for interpretation of soil quality. *In: Lucke, B., Bäumlér, R., Schmidt, M. (eds.). Soils and Sediments as Archives of Landscape Change, Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics. Publ. Selbstverlag der Fränkischen Geographischen Gesellschaft in Kommission bei Palm&Enke, chapter 42: 329-348, Germany.*
- Alkaeed O., Flores C., Jinno K. and Tsutsumi A. 2006. Comparison of several

- reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula Area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol. 66, No.1, 1-14.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome, 322 pp.
- Arnold R.W., Szabolcs I., Targulian V.O. (Eds.). 1990. *Global soil change*. Publ. IIASA, Laxenburg, Austria, 109 p.
- Boyer J. and Kramer P. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press Inc., USA, 495 p. (<http://udspace.udel.edu/handle/19716/2830>)
- Brigido J.G., Nikolskii-Gavrilov I., Terrazas L, y Herrera S.S. 2015. Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4): 101-116, Mexico.
- Bryant R.B., Arnold R.W. (ed). 1994. *Quantitative modeling of soil forming processes*. Soil Sci. Soc. Am. Publ., No. 39, Madison, Wisconsin, USA, 185 p.
- Castillo-Alvares M., I. Nikolskii-Gavrilov, C.A. Ortiz-Solorio, H. Vaquera-Huerta, G. Cruz-Bello, E. Mejía-Saenz y A. Gonzalez-Hernández. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*, 32(6): 368-376, Venezuela.
- Driessen P. M., and N. T. Konijn. 1992. *Land-use systems analysis*. Wageningen Agricultural University. 6701 AR Wageningen The Netherlands. 230 p.
- De Wit C.T. 1965. *Photosynthesis of leaf canopies*. Agricultural Research Reports No. 663. Institute for Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage, Wageningen, Holland, table 6 on page 48 (total 64 pages)
- Fan J., McConkey B., Wang H., Janzen H. 2016. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*, 189: 68-74. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>)
- FAO/IISA. 2012. *Global Agro-Ecological Zones. GAEZ v3.0 (Module I-VII). Model documentation*. Publ. FAO, Rome, Italy, 196 p.

- FAO. 2012. Crop response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, 501 p.
- FRERE, M. y G.F. POPOV. 1986. Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. Estudio FAO Publicacion № 73. Producción y protección animal. FAO. Roma, Italia, 194 pp.
- Hyams D.A. 2017. *Curve Fitting System for Windows* (computer program), version 1.40. Ed. Microsoft Corp., USA.
- Jenny H. 1941. Factors of soil formation. McGraw-Hill Publ., New-York.
- Jenny H. 1961. Derivation of state factor equations of soils and ecosystems. Soil Science Society of America Proceedings, #25: 385–388.
- Lucke B., I. Nikolskii, H. Helbron and Palekhov. 2010. Progressive development and strategic environmental assessment. *In: Issar A.S. (Edit). “Progressive Development to Mitigate the Negative Impact of Global Warming on the Semi-Arid Regions”*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany: 89-133.
- Lucke B., Nikolskii I. and Baumler R. 2013. Soils in arid and semi-arid regions. The past as key for the future. *In: Shahid S.A., Taha F.K., Abdelfattah M.A. (Edits) "Developments in Soil Classification. Land Use Planning and Policy Implications"*. Publ. Springer Dordrecht Heidelberg, New York-London, 269-284.
- Nikolskii-Gavrilov I., Aidarov I.P., Landeros-Sanchez C., Herrera-Gomez S. and Bakhlaeva-Egorova O. 2014. Evaluation of soil fertility indices of freshwater irrigated soils in Mexico across different climatic regions. *Journal of Agricultural Science*, vol. 6, No. 6: 98-107.
- Terrazas-Mendoza L., I. Nikolskii-Gavrilov, S. Herrera-Gómez, M. Castillo-Alvares, A. Exebio-García. 2010. Alteración de la fertilidad del suelo y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(1): 87-102, Mexico.
- Xui C.Y. and Singh V.P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potenciales with data from Switzerland. *Water Resources*

Management, 16: 197–219.

Дополнительная литература:

FAO/IIASA. 1999. *Soil and Terrain Database for North and Central EURASIA (Version 1.0)*, CDROM, FAO, Rome. (FAO Land and Water Digital Media Series #7 (1999)).

FAO/IIASA/Dokuchaiev Institute. 1999. Russian Academy of Agricultural Sciences. *Soil and Terrain Database for North and Central Eurasia at 1:5 million scale*. FAO Land and Water Digital Media series 7. FAO, Rome, Italy.

FAO/ISRIC. 2000. *Soil and Terrain Database, Land Degradation Status and Soil Vulnerability Assessment for Central and Eastern Europe Version 1.0 (1:2.5 million scale)*. Land and Water Digital Media Series # 10. FAO, Rome, Italy.

FAOSTAT (Time-series and cross sectional data relating to food and agriculture). FAO. Rome. (<http://faostat.fao.org/default.aspx>)

Kassam A.H. 1977. Net biomass production and yield of crops. Present and Potential Land Use by Agro-Ecological Zones Project. AGLS, Rome, FAO, 38 стр.; FAO. 1978. Report on the Agro-Ecological Zones. Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. Rome, FAO.

ВМО. 2008. Публикация 168, т.1, глава 4 «Испарение, суммарное испарение и влажность почвы», 34 с.

(http://www.whycos.org/hwrrp/guide/chapters/russian/original/WMO168_Ed2008_Vol_I_Ch4_Up2008_ru.pdf)