

УДК 556.06+556.13+631.6.02

**ИЗМЕНЕНИЕ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ ЗЕМНОГО ШАРА, В СВЯЗИ С
ВОЗМОЖНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА¹**

© 2021 г. Е.М. Гусев, О.Н. Насонова, Е.Э. Ковалев

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2020. После доработки 01.02.2021. Принята к публикации 01.04.2021.

На основе разработанной в Институте водных проблем Российской академии наук модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP были получены сценарные прогнозы изменения климатической влагообеспеченности растительного покрова (показателя влагообеспеченности, усредненного за климатический период ~ 30 лет), а также изменения variability годовых значений влагообеспеченности растительного покрова при возможном изменении климата в XXI веке для ряда крупных речных бассейнов земного шара, характеризующихся различными природными условиями. Показателем влагообеспеченности территории при этом послужило отношение реальной годовой транспирации к ее потенциальному значению. Географическими объектами исследования стали 11 речных бассейнов, исследованных в рамках международного проекта ISI-MIP и расположенных на разных континентах в различных природных условиях: Рейн, Тагус, Ганг, Лена, В. Хуанхэ, В. Янцзы, Нигер, Маккензи, В. Миссисипи, В. Амазонка и Дарлинг. В качестве информационного обеспечения при проведении расчетов по модели SWAP использовались метеорологические характеристики до конца XXI в., полученные с помощью пяти моделей общей циркуляции атмосферы и океана для четырех сценариев изменения климата семейства RCP.

Показано, что только пять из 11 выбранных речных бассейнов характеризуются дефицитом увлажнения, а именно: бассейны Тагуса, Ганга, Нигера, В. Миссисипи и Дарлинга. Территории бассейнов остальных рек имеют гумидный и полугумидный характер увлажнения, который сохранится и при изменении климата до конца XXI в. Для пяти указанных бассейнов было более детально проанализировано изменение степени их влагообеспеченности, обусловленное возможным изменением климата. Исследованы изменения как среднего (климатического) значения их годовой влагообеспеченности, так и степени variability влагообеспеченности для отдельных лет на основе построения интегральной функции распределения влагообеспеченности для рассмотренных в работе климатических периодов (исторического и прогностических). Показано, что для исследованных аридных и полуаридных бассейнов и без того малая степень их влагообеспеченности к концу XXI в. либо сохранится на современном уровне, либо еще больше уменьшится.

Таким образом, для аридных и полуаридных регионов тенденция возможных изменений климата в XXI в. еще сильнее обострит стоящую перед человечеством серьезную проблему продовольственной безопасности, затрагивающей сектора сельского хозяйства и связанного с ним водного хозяйства. Эта проблема потребует ускоренного перехода взаимодействия человека с Природой на принципы «зеленого земледелия», в основе которого лежит применение природоподобных (nature-based) технологий использования природных ресурсов, рационализирующих потребление водных, почвенных, энергетических и других ресурсов планеты.

Ключевые слова: влагообеспеченность растительного покрова, речной бассейн, суммарное

¹ Работа выполнена в рамках тем Государственного задания ИВП РАН: № 0126-2021-0001 (№ гос. регистрации 121040700170-9) «Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма» и № 0147-2018-0001 (№ гос. регистрации АААА-А18-118022090056-0) «Изучение и моделирование процессов гидрологического цикла суши, гидрофизических и гидродинамических процессов, закономерностей формирования ресурсов поверхностных, почвенных и подземных вод в изменяющихся природных условиях», а также при финансовой поддержке РФФ, грант № 16-17-10039 «Расчеты и прогнозы (с оценкой их неопределенности) составляющих водного баланса речных бассейнов, расположенных на различных континентах Земного шара».

испарение, сценарии изменения климата RCP, гидрологическое и климатическое моделирование, аридные территории.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10158

В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2012, 2014) констатируется однозначность потепления климатической системы Земли. Так, в 2015 году ее средняя температура оказалась на 1.02°C выше той, которую фиксировали в XIX веке, когда началось наблюдение за изменениями глобальной температуры (ТАСС, 2017). Глобальное количество осадков выросло в среднем по земному шару примерно на 2% в течение последнего столетия (IPCC, 2001) при больших различиях между континентами (IPCC, 2001; EGA, 2002).

Изменение климата ведет к изменениям различных характеристик климатической системы Земли, причем как их средних значений, так и частоты и интенсивности экстремальных климатических, метеорологических, агрометеорологических и гидрологических явлений. Многие экстремальные явления по-прежнему обусловлены естественной климатической изменчивостью, связанной с так называемым «погодным шумом». Тем не менее, антропогенные изменения климата представляют собой дополнительный фактор в формировании экстремальных явлений в будущем (IPCC, 2012). Одно из экстремальных явлений погоды, затронувшее многие части планеты за прошедшие годы XXI века и принесшее значительный ущерб, – это засуха (Изменение климата, 2012). Экстремально засушливые условия были отмечены в Австралии, восточной части Африки, регионе Амазонии и западных районах Соединенных Штатов Америки. Значительные волны тепла (жары) воздействовали на Европу в 2003 г. и на Россию в 2010 г.

По этой причине данная работа посвящена анализу изменений в связи с возможным изменением климата такой важной характеристики, как засушливость (или увлажненность) того или иного региона земного шара, поскольку при оценках рисков возникновения негативных социально-экономических и других последствий, обусловленных такими экстремальными событиями, как засухи, необходимо уметь прогнозировать не только изменение характеристик засушливости территории в климатическом масштабе, но и изменение частоты появления засушливых лет.

В настоящее время имеется целый ряд работ, посвященных этому вопросу (IPCC, 2012, 2014; Literature Synthesis ..., 2013). В них многолетнее прогнозирование засушливости различных территорий, как правило, основано на использовании результатов модельных расчетов, полученных с применением климатических, гидрологических моделей, моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой, в свою очередь опирающихся на соответствующие сценарии социально-экономического развития (подобные результаты в настоящее время формально можно получить даже для прогнозного периода в несколько столетий). Тем не менее, в одной из них (IPCC, 2012) сделан вывод, что количество имеющихся в литературе прогнозов изменения степени засушливости рассматриваемой территории и частоты появления экстремально засушливых лет пока ограничено как для регионального и континентального масштабов, так и для масштаба отдельного речного бассейна (особенно для регионов за пределами Европы и Северной Америки). К тому же надежность полученных прогнозов еще относительно низка.

В связи со сказанным целью данной работы явилось получение сценарных прогнозов изменения климатической засушливости (или климатической увлажненности) – показателя, усредненного за климатический период ~ 30 лет, а также изменения вариабельности ее годовых показателей при возможном изменении климата в XXI веке для ряда крупных речных бассейнов земного шара, характеризующихся различными природными условиями. Исследование выполнялось в рамках международного проекта Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP; Warszawski et al., 2014), одной из задач которого стало объединение усилий сообщества модельеров гидрологических процессов для обобщения получаемых прогностических оценок воздействия глобального изменения климата на водный режим и водные ресурсы геофизических объектов разных пространственных масштабов, в том числе и речного бассейна, а также возможных мероприятий по устранению негативных последствий изменения климата в указанном секторе хозяйственной деятельности человека.

Объекты и методы исследования

Объектами данного исследования послужили 11 крупных речных бассейнов (рис. 1а),

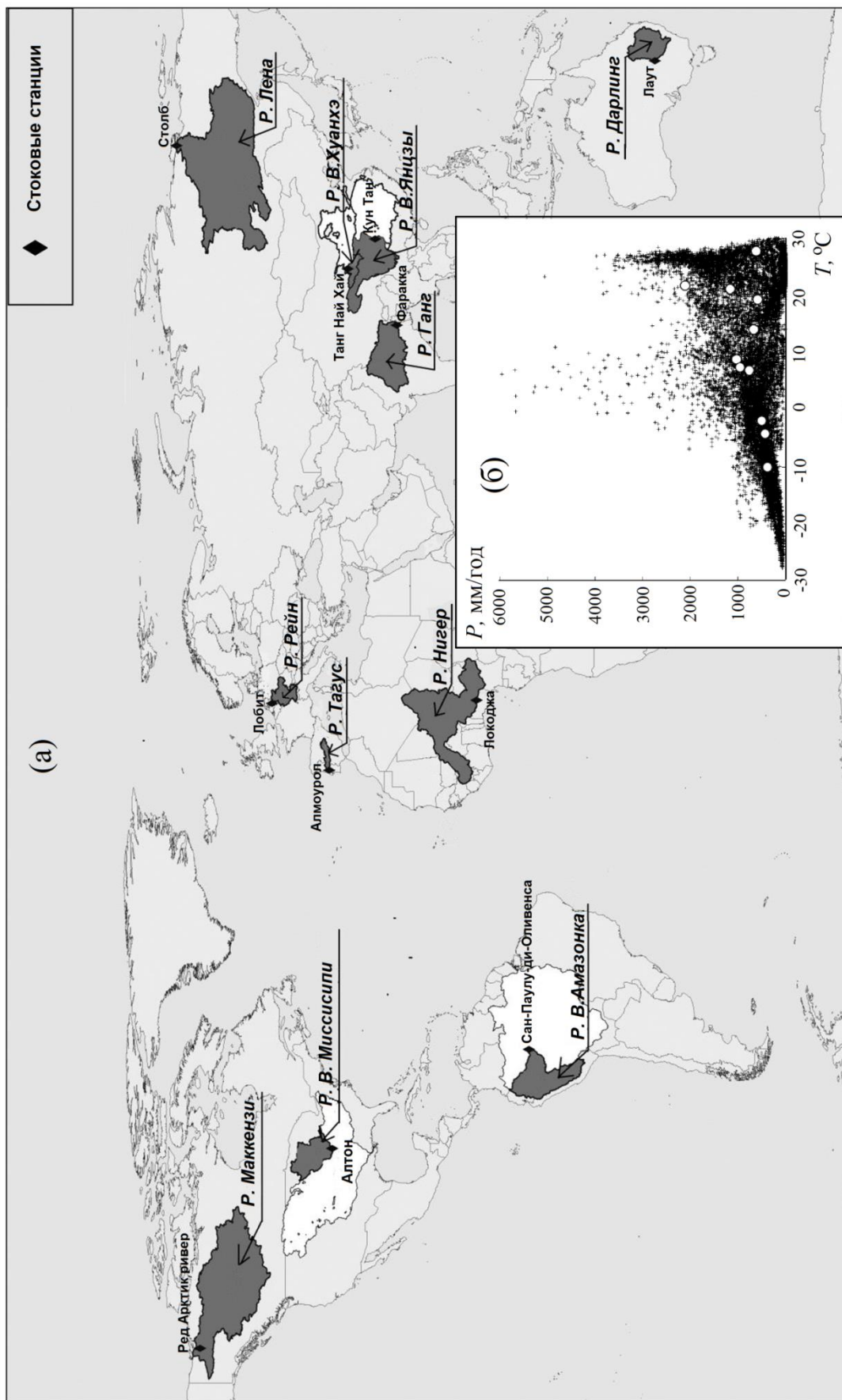


Рис. 1. Расположение рассмотренных в работе речных бассейнов на территории Земли (а) и в фазовом пространстве усредненных по площади соответствующего объекта климатических значений среднегодовой приземной температуры T и атмосферных осадков P (б). Здесь маленькими крестами отмечено положение в фазовом пространстве T и P относящихся к территории суши ячеек пространственной сетки планеты с одноградусным разрешением, кружками – выбранные для исследования речные бассейны (Гусев и др., 2018).

рассматриваемых в международном проекте ISI-MIP, расположенных на разных континентах земного шара в различных природных условиях: Рейн и Тагус в Европе; Ганг, Лена, Верхняя Хуанхэ и Верхняя Янцзы в Азии; Нигер в Африке; Маккензи и Верхняя Миссисипи в Северной Америке, Верхняя Амазонка в Южной Америке и Дарлинг в Австралии (Гусев и др., 2018). Основные характеристики выбранных речных бассейнов приведены в таблице 1 (Krysanova, Hattermann, 2017; Гусев и др., 2018).

Таблица 1. Рассмотренные в работе речные бассейны, их площади, число расчетных ячеек, стоковые станции с координатами, а также усредненные по площади климатические характеристики бассейнов (для периода с 1971 по 2000 гг.): приземная температура воздуха T , осадки P , речной сток R , коэффициент стока R/P (Krysanova, Hattermann, 2017; Гусев и др., 2018).

Река	Стоковая станция	Географическая широта, °	Географическая долгота, °	Площадь бассейна (км ²)	Число расчетных ячеек	T , °C	P , мм/год	R , мм/год	R/P
Лена	Столб	72.37	126.80	2 460 000	1668	-10.2	384	201	0.52
В. Амазонка	Сан-Паулу-ди-Оливенса	-3.45	-68.75	990 781	330	21.7	2122	1459	0.69
Маккензи	Арктик Ред Ривер	67.46	-133.74	1 660 000	1128	-4.3	435	171	0.39
В. Янцзы	Кун Тан	29.61	106.60	804 859	325	6.8	768	389	0.51
Ганг	Фаракка	25.00	87.92	835 000	340	21.1	1173	471	0.4
В. Хуанхэ	Танг Най Хай	35.50	100.15	121 000	51	-2	506	169	0.33
Нигер	Локоджа	7.80	6.77	2 074 171	678	27.7	625	77	0.12
Рейн	Лобит	51.84	6.11	160 800	83	8.7	1038	457	0.44
В. Миссисипи	Алтон	38.89	-90.18	444 185	198	7.3	967	257	0.27
Тагус	Алмоурол	39.47	-8.37	67 490	35	14	671	152	0.23
Дарлинг	Лаут	-30.53	145.11	489 300	180	19.2	590	8	0.01

В данной работе бассейны были схематизированы в виде совокупности ячеек регулярной сетки с пространственным разрешением по широте и долготе $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, соединенных речной сетью. Количество расчетных ячеек для каждого бассейна приведено в таблице 1. На рисунке 1б в фазовом пространстве двух климатических характеристик (среднегодовых значений среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков) показаны два набора пространственных объектов суши. Первый представляет собой совокупность всех ячеек суши (за исключением Антарктиды), второй – 11 речных бассейнов. Среднегодовые температуры воздуха и осадки для указанных объектов – усредненные по площади характеристики, определенные на основе глобальной метеорологической базы данных Water and Global Change (WATCH; Weedon et al., 2011). Как следует из рисунка 1б, речные бассейны представляют собой выборку объектов суши, более или менее репрезентативно отражающую, по крайней мере, по климатическим характеристикам, специфику значительной части суши земного шара.

Для оценки степени годового увлажнения (или степени засушливости) территории используются разные показатели (Грингоф, Клещенко, 2011). В частности, например, широко известен показатель увлажнения Высоцкого-Иванова (Иванов, 1948):

$$KV = P/E_p \quad (1),$$

где P – сумма осадков за год, E_p – годовое потенциальное суммарное испарение (годовая испаряемость). Однако рассмотренные И.Г. Грингофом и А.Д. Клещенко (2011) критерии характеризуют степень увлажненности территории в целом (в показатели включено испарение

растительным покровом (транспирация) и испарение с почвы). В отличие от этого в настоящей работе понятия засухи или засушливости связаны с условиями существования растительного покрова (физиологическая засуха), поэтому для характеристики степени засушливости (увлажненности) рассматриваемой территории был выбран несколько иной подход.

В некоторых работах (Gusev, Novak, 2007; Гусев, Насонова, 2010; Гусев, 2012) показано, что в процессе эволюции жизни на Земле произошло сопряжение двух глобальных циркуляционных диссипативных структур, двух гигантских «шестеренок»: физической циркуляции воды в системе почва – растительный покров – атмосфера и циркуляции биоэлементов в экосистемах наземных растений. Без этого сопряжения невозможно приведение в действие онсагеровских круговоротов биоэлементов в системе зеленых растений суши. Поскольку же зеленые растения представляют собой начальное звено трофической цепи наземных экосистем, циркуляция воды в системе почва – растительный покров – атмосфера по существу «раскручивает» круговорот биоэлементов во всей системе биоценозов суши, т.е. жизнь на планете.

Отсюда следует, что диссипативная структура циркуляции воды в системе почва – растительный покров – атмосфера является необходимым экологическим ресурсом, названным «ресурсом почвенных вод» (Будаговский, 1985; Gusev, Novak, 2007; Гусев, 2012) и используемым биоценозами суши. Мерой ресурсов почвенных вод, т.е. показателем, характеризующим потенциальную мощность используемой биосферой циркуляции воды в системе почва – растительный покров – атмосфера, может служить величина суммарного испарения с рассматриваемой территории суши за характерный промежуток времени, например за год.

Рассматриваемый подход дает возможность ввести такой показатель, как влагообеспеченность растительного покрова η_w (Будаговский, 1985; Гусев, 2012), определяемый как:

$$\eta_w = E_T / E_{PT} \quad (2),$$

где E_T – транспирация растительного покрова, E_{PT} – потенциальная транспирация, т.е. транспирация растительного покрова в условиях достаточного увлажнения, когда E_T не лимитируется влажностью почвы, регулирующей степень открытости устьиц листьев, и имеет максимальное при конкретных метеорологических условиях значение (устьица листьев в этом случае максимально открыты). Именно η_w использован в работе в качестве показателя увлажненности территории, в то время как разность $(1 - \eta_w)$ можно трактовать как показатель засушливости. Важность показателя η_w связана с тем, что он может служить и показателем отличия реальной урожайности сельскохозяйственных культур от ее оптимального значения, поскольку в первом приближении как первичная продуктивность растительного покрова, так и хозяйственный урожай сельскохозяйственных культур находятся в пропорциональной зависимости от количества воды, испарившейся через листья растения (транспирации; Слэйчер, 1970; Ограничивающие факторы ..., 2011; Влияние воды ..., 2019).

Расчет изменения в XXI веке климатических (средних за продолжительный период ~ 30 лет) годовых значений η_w для выбранных речных бассейнов был проведен с использованием рядов реальной и потенциальной транспирации, рассчитанных с помощью модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants; Гусев, Насонова, 2010).

Модель SWAP и ее информационное обеспечение

Модель SWAP представляет собой физико-математическую модель, описывающую процессы тепло- и влагообмена в системе почва – растительность/снежный покров – атмосфера. В этой модели исследуемый бассейн представляется в виде совокупности ячеек регулярной сетки, для каждой из которых задаются значения метеорологических характеристик и параметров подстилающей поверхности, на основе которых рассчитывается динамика гидрологических и геофизических характеристик. Работоспособность модели SWAP в отношении воспроизведения указанных характеристик была многократно проверена на различных экспериментальных данных, в том числе и в отношении воспроизведения характеристик испарения с крупных речных бассейнов и континентов (Гусев, Насонова, 2004; Гусев и др., 2006). Выходными переменными модели SWAP являются несколько десятков характеристик теплового и водного режимов рассматриваемого речного бассейна, однако в данной работе в связи с поставленной задачей будут рассмотрены только годовые значения реальной и потенциальной транспирации, потенциального суммарного испарения и показателя

влажностности территории η_w .

Информационное обеспечение модели SWAP включает в себя: 1) необходимую для задания верхних граничных условий приземную метеорологическую информацию (атмосферные осадки, температуру и влажность воздуха, интенсивности приходящих потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, скорость ветра и атмосферное давление), 2) параметры подстилающей поверхности (характеристики почвы, растительности, рельефа и др.), 3) гидрологические характеристики для калибровки и проверки модели.

Для калибровки и последующей проверки модели суточные значения метеорологических элементов за период 1969-2001 гг. были взяты из вышеупомянутой глобальной базы данных WATCH, созданной на основе гибридизации данных реанализа ERA-40 с месячными значениями наземных измерений из баз данных GPCC (Global Precipitation Climatology Center) и университета Восточной Англии CRU (Climatic Research Unit) и включающих в себя температуру воздуха, количество дней с осадками, облачность и осадки.

Для прогностических расчетов использовались суточные метеорологические данные за период с 2006 по 2099 гг., полученные по пяти моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО): HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M и NorESM1-M (Krysanova, Hattermann, 2017) на основе четырех сценариев изменения климата семейства RCP (Representative Concentration Pathways; Moss et al., 2008): RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, использованных при подготовке 5-го оценочного доклада IPCC (2014; Intergovernmental Panel on Climate Change). Числа в аббревиатуре сценариев соответствуют приращению значений приходящей радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в 2100 г., вызванному увеличением эмиссии парниковых газов в атмосферу по сравнению с доиндустриальным периодом. Большие значения чисел соответствуют более агрессивным антропогенным сценариям, обусловленным повышенной эмиссией парниковых газов в атмосферу и слабыми мерами по ограничению их выбросов. Кроме того, в работе использовались рассчитанные по МОЦАО значения метеорологических элементов для исторического периода (1962-2005 гг.).

Для повышения качества последующих гидрологических расчетов в рамках ISI-MIP2 была проведена постпроцессинговая коррекция значений метеорологических элементов (Warszawski et al., 2014), полученных по пяти вышеперечисленным МОЦАО, с целью уменьшения возможных систематических ошибок расчета. Коррекция проводилась по соответствующим данным из WATCH для исторического (базового) периода P0 (1962-2005 гг.), на основе которых оптимизировались наиболее важные параметры бассейнов.

Параметры подстилающей поверхности для каждой расчетной ячейки бассейнов были получены с использованием экосистемной базы данных ECOCLIMAP (Chamreux et al., 2005) по методике, изложенной в работе Ye.M. Gusev с соавторами (2018).

Калибровка некоторых параметров модели и последующая верификация осуществлялись за исторический период по данным измерения речного стока с выбранных бассейнов, предоставленных организаторами ISI-MIP2 (Gusev et al., 2018).

Расчеты по модели SWAP

Расчеты E_p , E_t , E_{PT} и η_w вышеуказанных 11 рек были проведены на основе модели SWAP с использованием полученных по пяти МОЦАО значений метеорологических элементов для двух периодов: исторического P0 (1962-2005 гг.) и прогностического (2006-2099 гг.), который, в свою очередь, при анализе результатов был разделен на три части: P1 (2006-2035 гг.), P2 (2036-2065 гг.) и P3 (2066-2099 гг.). Для прогностического периода указанные характеристики рассчитывались для четырех вышеупомянутых климатических сценариев семейства RCP. Для показателя η_w были построены эмпирические интегральные функции распределения $F(\eta_w)$ для соответствующих климатических периодов, показывающие как меняется не только климатическое значения η_w , но и вариабельность этого показателя и его экстремальные значения.

В работе V.P. Meleshko с соавторами (2004) показано, что прогнозные оценки различных геофизических характеристик оказываются более успешными, если они усредняются по ансамблю независимых моделей. В связи с этим характеристики E_p , E_t , E_{PT} , η_w и $F(\eta_w)$, рассчитанные для каждой МОЦАО (GCM), каждого бассейна (Bas), каждого климатического сценария (Scen) и каждого климатического периода (Pi, где $i=0, 1, 2, 3$), были усреднены по пяти используемым МОЦАО. Кроме

того, с целью получения более устойчивых результатов значения указанных характеристик были усреднены также по всем четырем RCP-сценариям. Полученные таким образом годовые показатели E_p , E_T , E_{PT} , η_w и $F(\eta_w)$ для конкретного бассейна можно трактовать как значения этих показателей для некоторого "среднего" RCP-сценария, включающего в себе особенности всех 4-х сценариев. Именно они и были использованы для анализа изменения степени увлажненности территории соответствующего бассейна для климатических периодов P_i ($i=1, 2, 3$) по сравнению с историческим периодом P_0 .

Результаты и их обсуждение

Прежде чем анализировать полученные результаты, рассмотрим рассчитанные на основе SWAP данные по степени увлажненности выбранных речных бассейнов в соответствии с коэффициентом увлажнения по Высоцкому-Иванову (КУ). В первом приближении этот показатель дает представление о степени аридности или гумидности территории бассейнов, позволяя отнести рассмотренные бассейны к соответствующей области увлажнения (табл. 2).

Таблица 2. Изменение во времени распределения по областям увлажнения рассмотренных речных бассейнов.

Область увлажнения	Диапазон значений КУ	Речной бассейн	Среднее значение КУ для исторического периода P_0	Среднее значение КУ для прогностического периода P_3
Избыточно влажная	>1.33	В. Хуанхэ	1.67	1.51
		В. Янцзы	1.56	1.38
		В. Амазонка	3.16	2.87
		Рейн	1.51	1.34
		Лена	1.37	1.44
Влажная	1.33-1.00	Маккензи	1.06	1.05
Полувлажная	1.00-0.77	В. Миссисипи	0.96	0.86
Полузасушливая	0.77-0.55	–	–	–
Засушливая	0.55-0.41	Ганг	0.52	0.56
		Тагус	0.45	–
Очень засушливая	0.41-0.33	Тагус	–	0.35
		Дарлинг	0.40	0.36
Полусухая	0.33-0.22	–	–	–
Сухая	0.22-0.12	Нигер	0.20	0.22
Очень сухая	<0.12	–	–	–

Как видно из таблицы 2, в настоящее время (в рамках исторического климатического периода – P_0) бассейны рек Маккензи, Лены, В. Хуанхэ, В. Янцзы, В. Амазонки и Рейна относятся к регионам с гумидным климатом (влажные и избыточно влажные области). Гумидность бассейнов рек Маккензи и Лены, несмотря на относительно небольшие (по сравнению с другими рассмотренными реками) значения годовых осадков (табл. 1), определяется их расположением в бореальной зоне, для которой характерны низкие значения приходящей радиации, что приводит к очень малому потенциальному суммарному испарению. Сильная увлажненность бассейна р. Рейн связана с его климатом (переходным от морского к континентальному), характеризующимся обильными осадками, приходящими с Атлантического океана. Что касается верховий рек Янцзы и Хуанхэ, то их гумидность обусловлена их высокогорным расположением (~ 3000 и 4000 м н.у.м. БС соответственно). Для верховий этих рек характерны малые годовые значения суммарного испарения при умеренных годовых осадках. В примыкающей к Андам верхней части бассейна р. Амазонки очень высоки значения осадков, которые составляют >2000 мм/год (табл. 1), что приводит к чрезмерной увлажненности территории.

Для всех указанных шести рек, согласно проведенным расчетам, соответствующим RCP-сценариям изменения климата, бассейны этих рек и к концу XXI в. (период P_3) сохранят свою

гумидность. Причем для всех этих рек, кроме Лены и Маккензи, бассейны которых находятся в высоких широтах, значения КУ немного понизятся в связи с более существенным увеличением потенциального испарения по сравнению с ростом осадков. Что касается р. Маккензи, то степень увлажненности ее бассейна практически не изменится, а увлажненность бассейна р. Лены немного увеличится. Следует отметить, что в бассейнах всех шести рек такие экстремальные явления как засухи практически отсутствуют. Поэтому дальнейший анализ в отношении засушливости территории и ее изменения в XXI в. будет проведен только для бассейнов рек Тагус, Ганг, Нигер, В. Миссисипи и Дарлинг, расположенных в диапазоне областей от полувлажной до сухой (табл. 2).

На рисунке 2 представлена более информативная характеристика показателя увлажненности речных бассейнов – интегральное распределение рассчитанных годовых значений влагообеспеченности растительного покрова η_w для бассейнов выбранных пяти рек для исторического периода P0 и прогностического периода P3, в таблице 3 – средние значения η_w для указанных климатических периодов. Рассмотрим распределения η_w для каждой из рек.

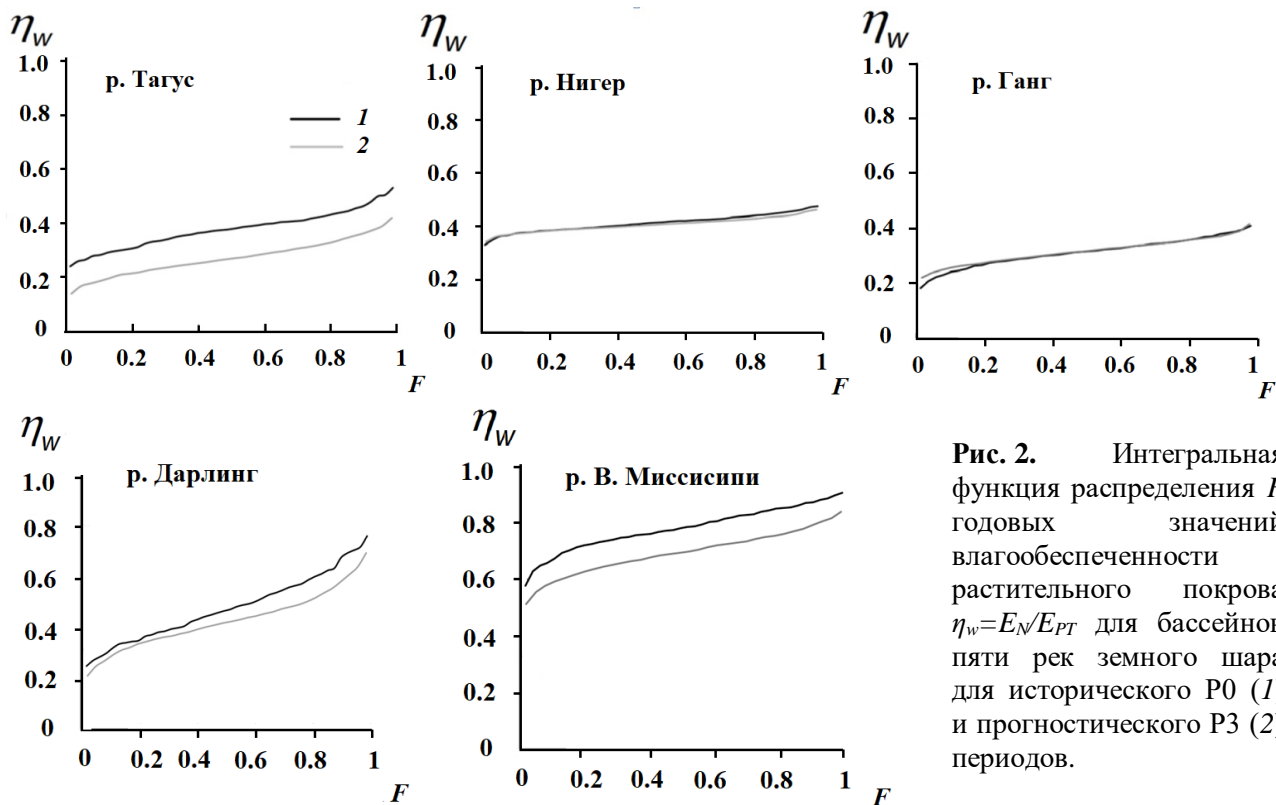


Рис. 2. Интегральная функция распределения F годовых значений влагообеспеченности растительного покрова $\eta_w = E_N/E_{PT}$ для бассейнов пяти рек земного шара для исторического P0 (1) и прогностического P3 (2) периодов.

Начнем с наименее проблемной реки в отношении засушливости ее бассейна – р. В. Миссисипи (рис. 1). Согласно таблице 2, ее бассейн расположен в полувлажной области. Климат в данном регионе можно отнести к континентальному. Сельское хозяйство – основополагающая индустрия региона. Здесь выращиваются кукуруза, пшеница, соевые бобы, рис и многие другие культуры. Как видно на рисунке 2 и в таблице 3, влагообеспеченность растительного покрова η_w в бассейне В. Миссисипи в естественных условиях, хотя и достаточно высокая (среднее значение $\eta_w \approx 0.78$), но все же неоптимальная. Поэтому в целях повышения η_w используется орошение сельскохозяйственных земель из водной системы р. Миссисипи через целую систему водохранилищ, которое переводит ресурсы поверхностных вод в ресурсы почвенных вод, увеличивая η_w .

Рисунок 2 показывает, что влагообеспеченность растительного покрова в бассейне р. В. Миссисипи в связи с предполагаемым изменением климата к концу XXI в. уменьшится, а среднее значение η_w станет ≈ 0.69 , хотя бассейн реки продолжит оставаться в полувлажной области (табл. 2), что потребует увеличения объемов орошения. Но даже в самые засушливые годы η_w в отсутствие орошения не будет опускаться ниже 0.5.

Теперь рассмотрим бассейны двух рек, отличающихся муссонным климатом, отличительной особенностью которого является резкое преобладание приносимых с океана осадков летом и практически полное их отсутствие зимой. Это реки Ганг и Нигер (рис. 1). Согласно КУ Высоцкого-Иванова (табл. 2), бассейн р. Ганг относится к засушливой области ($KУ=0.52$), а р. Нигер – к сухой ($KУ=0.20$). Однако, как следует из рисунка 2 и таблицы 3, влагообеспеченность растительного покрова в естественных условиях в бассейне р. Ганг все же ниже, чем в бассейне р. Нигер. Связано это с тем, что в бассейне р. Ганг выпадающие осадки гораздо выше (\approx в 1.9 раза), чем в р. Нигер, а потенциальное суммарное испарение ниже (\approx в 1.4 раза, поэтому выше КУ), но значительная часть этих осадков трансформируется в речной сток (отношение R/P для р. Ганг почти в 3.5 раза выше, чем для р. Нигер) и доля осадков, идущих на суммарное испарение, оказывается меньше, чем для р. Нигер. Сказанное еще раз подчеркивает, что η_w является более информативным показателем физиологической засушливости территории, чем КУ.

Таблица 3. Изменение климатических значений влагообеспеченности растительного покрова η_w для рассмотренных речных бассейнов в связи с возможными изменениями климата.

Бассейн реки	Среднее значение η_w для климатического периода P0	Среднее значение η_w для климатического периода P3
В. Миссисипи	0.78	0.69
Ганг	0.31	0.31
Тагус	0.38	0.27
Дарлинг	0.48	0.43
Нигер	0.41	0.40

Рисунок 2 и таблица 3 свидетельствуют о том, что годовая влагообеспеченность растительного покрова в обоих бассейнах крайне низка: среднее значение η_w для бассейна р. Нигер ≈ 0.41 , а для бассейна р. Ганг ≈ 0.31 . Основным приемом повышения влагообеспеченности является перевод ресурсов поверхностных и подземных вод (особенно в бассейне р. Ганг) в ресурсы почвенных вод посредством орошения, которое применяется при выращивании таких культур как рис, сахарный тростник, чечевица, масличные культуры, картофель и пшеница в бассейне р. Ганг, а также бобовые, кукуруза, просо, рис, сахарный тростник, сорго, маниока и хлопчатник в бассейне р. Нигер. Тем не менее, даже при использовании орошения влагообеспеченность растительного покрова зависит от регулярности и обилия муссонных дождей. Без муссонов наступает голод. Так, самый опустошительный и тяжелый в Индии голод длился в течение двух лет – с 1876 по 1877 гг. На территории округа Мадрас и в районах Бомбея и Пуны смерть унесла около 6 миллионов человек. В бассейне р. Нигер засухи чаще всего наступают в северной части, которую пересекает Сахель, – полоса африканских саванн, расположенная южнее Сахары. Сильнейшая засуха длилась в Сахеле с 1968 по 1973 гг. За этот период только в Нигерии от истощения и болезней погибло более 100 тыс. человек.

Как видно из рисунка 2 и таблицы 3, ожидаемые климатические изменения к концу XXI в. практически не скажутся на влагообеспеченности растительного покрова обоих рассмотренных бассейнов. Очень острая проблема повышения влагообеспеченности сохранится для бассейнов обеих рек на прежнем уровне.

Перейдем к рассмотрению двух речных бассейнов, для которых аридность их территорий с изменением климата увеличится. Это бассейны рек Тагус и Дарлинг.

Тагус – крупнейшая река Пиренейского полуострова, Иберии (рис. 1). Общая ее протяжённость – 1038 км, из которых 716 км приходятся на территорию Испании, 47 км она течет по границе Испании и Португалии и последние 275 км – по территории Португалии. Питание реки дождевое. Климат в ее бассейне – средиземноморский с сильным континентальным влиянием. Тагус протекает в основном через полупустынные земли. Треть из них занимают орошаемые агроэкосистемы, включающие зерновые хозяйства, оливковые сады и виноградники. В бассейне реки имеется много водоемов, предназначенных для различных целей, в частности, орошения, городского водоснабжения и гидроэнергетики.

Согласно классификации Н. Иванова (табл. 2) в настоящее время бассейн р. Тагус находится в засушливой области увлажнения. Показатель влагообеспеченности растительного покрова η_w практически во все годы не поднимается выше 0.5 (рис. 2). Отметим, что уже в настоящее время европейская общественность обеспокоена тяжелым состоянием р. Тагус (Spain's Tagus river ..., 2017; Fernández, 2016), бассейн которой находится в тисках сильнейшей засухи с 2014 г., самой тяжелой за последние двадцать лет. Эксперты опасаются, что к 2100 году значительная часть речного бассейна может превратиться в пустыню. И действительно, проведенные в данной работе расчеты показывают, что к концу XXI в. аридность территории бассейна р. Тагус усилится, что приведет к его переходу из засушливой в очень засушливую область (табл. 2), а показатель η_w во все годы не будет достигать даже 0.4, а в половине лет не будет превышать 0.27 (рис. 2, табл. 3). При этом снизится и так относительно небольшой слой стока р. Тагус (Gusev et al., 2019), т.е. ресурсы для применения орошения посевов также уменьшатся. Таким образом, прогнозируется катастрофическое повышение степени аридности территории важнейшего для Пиренейского полуострова речного бассейна.

Бассейн р. Дарлинг расположен на юго-востоке Австралии (рис. 1) за Большим Водораздельным хребтом, который является барьером для пассатов, несущих осадки с Тихого океана. Климат в этой части Австралии тропический пустынный. Большая часть приходящих осадков выпадает на восточном склоне хребта, лишь изредка проникая в бассейн р. Дарлинг. Поэтому этот бассейн можно отнести к семиаридной зоне, дефицит испарения в нем (осадки минус потенциальное суммарное испарение) колеблется в диапазоне -500 ... -1000 мм/год (Australian Water ..., 2012). По классификации Н.Н. Иванова (1948) территория бассейна относится к очень засушливой области (табл. 2). Большую часть бассейна занимают пастбища, хотя выращивается пшеница и кукуруза (Australian Water ..., 2012). Среднее значение показателя водобеспеченности растительного покрова η_w в бассейне реки в настоящее время ≈ 0.48 (табл. 3). При этом специфика речного бассейна, связанная с большой неопределенностью поступления осадков, проникающих через Большой Водораздельный хребет, приводит как к значительной изменчивости годовых осадков, так и к изменчивости годового испарения и соответственно показателя η_w для территории бассейна (рис. 2), значение которого в настоящее время варьирует в диапазоне примерно от 0.25 до 0.79. Аридность территории требует использования значительной части вод р. Дарлинг для орошения земель.

Так же как и для р. Тагус, сценарное прогнозирование климатических изменений в районе бассейна р. Дарлинг свидетельствует об уменьшении речного стока (Gusev et al., 2019) и показателя водобеспеченности его территории η_w к концу XXI в. (рис. 2, табл. 3). Среднее годовое значение η_w становится равным 0.43 при его межгодовой вариации \sim от 0.2 до 0.7. Таким образом, к концу XXI в. проблемы, связанные с засушливостью территории бассейна р. Дарлинг, станут еще более острыми. Этот вывод уже в настоящее время подтверждается предварительными исследованиями, проведенными Администрацией бассейна речной системы Мюррей-Дарлинг в течение 30 лет, из которых следует, что необходимо разрабатывать системы адаптации, которые готовят указанный бассейн к «более сухому будущему» (Jason, 2019).

Обобщая результаты, полученные для рассмотренных речных бассейнов, можно сделать следующие выводы. Гумидные и полугумидные регионы при возможных изменениях климата к концу XXI в. сохранят свою достаточно высокую степень увлажненности. Что касается аридных и полуаридных областей, то они либо сохранят свою степень аридности, либо еще больше усилят ее. Этот результат в какой-то мере согласуется с встречающимся в литературе утверждением, что «к концу столетия в гумидной зоне станет ещё влажнее и теплее, в аридной – теплее и суше» (Сергиенко, Константинов, 2016, стр. 34).

Таким образом, тенденция возможных изменений климата в XXI в. в целом обострит и так стоящую перед человечеством проблему его продовольственной безопасности, затрагивающей сектора сельского хозяйства и связанного с ним водного хозяйства. Особенно это касается аридных и полуаридных регионов планеты. Поэтому необходимо ускорение и так неизбежного (Гусев, 2019) перехода человечества к ориентации на принципы «зеленой экономики», в основе которой лежит применение природоподобных (nature-based) технологий использование природных ресурсов, в том числе и в области сельского хозяйства, рационализирующего на принципах «зеленого земледелия» потребление водных, почвенных, энергетических и др. ресурсов планеты (Sustainable Management ..., 2010; WWAP, 2018; Гусев, 2019).

Выводы

Получены сценарные прогнозы изменения климатической влагообеспеченности растительного покрова (показателя влагообеспеченности, усредненного за климатический период (~ 30 лет)), а также изменения variability годовых значений влагообеспеченности растительного покрова соответствующей территории при возможном изменении климата в XXI веке для ряда крупных речных бассейнов земного шара, характеризующихся различными природными условиями. Показателем влагообеспеченности территории при этом послужило отношение реальной годовой транспирации к ее потенциальному значению. Исследования проводились для 11 крупных речных бассейнов, расположенных на разных континентах земного шара в различных природных условиях: Рейн, Тагус, Ганг, Лена, В. Хуанхэ, В. Янцзы, Нигер, Маккензи, В. Миссисипи, В. Амазонка, Дарлинг. Оценка влагообеспеченности проводилась с использованием разработанной в ИВП РАН модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP. В качестве информационного обеспечения при проведении расчетов использовались метеорологические характеристики до конца XXI в., полученные с помощью пяти моделей общей циркуляции атмосферы и океана для четырех сценариев изменения климата семейства RCP.

Проведенное исследование показало, что проблемы, связанные с засушливостью территории, имеют только бассейны 5 выбранных в работе рек: Тагус, Ганг, Нигер, В. Миссисипи и Дарлинг. Территория бассейнов остальных рек имеет гумидный и полугумидный характер, который сохранится и при изменении климата до конца XXI в. Для бассейнов пяти указанных рек было более детально проанализировано изменение степени их влагообеспеченности, обусловленное возможным изменением климата. В частности, были исследованы изменения как среднего климатического значения годовой влагообеспеченности речных бассейнов, так и variability влагообеспеченности по отдельным годам на основе построения интегральной функции распределения влагообеспеченности для рассмотренных в работе климатических периодов (исторического – 1962-2005 гг. и последнего из прогностических – 2066-2099 гг.). Проведенное исследование показало, что для указанных бассейнов степень их влагообеспеченности (и без того малая для четырех из них) к концу XXI в. либо сохранится на нынешнем уровне (такая же ситуация характерна, в частности, и для Крымского полуострова РФ (Гусев и др., 2021)), либо еще больше уменьшится.

Таким образом, в сельскохозяйственном секторе аридных и полуаридных регионов необходим ускоренный переход взаимодействия человека с Природой на принципы «зеленого земледелия», в основе которого лежит применение природоподобных (nature-based) технологий использования природных ресурсов, рационализирующих потребление водных, почвенных, энергетических и др. ресурсов планеты.

Благодарности. Авторы выражают благодарность организаторам водного сектора международного проекта ISI-MIP в региональном масштабе за предоставленные данные и материалы для рассмотренных в работе речных бассейнов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будаговский А.И. 1985. Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова // Водные ресурсы. № 4. С. 3-13.
- Влияние воды и кислорода на развитие пшеницы. 2019 [Электронный ресурс <https://agroexpert.md/rus/agronomiya/vliyanie-vody-i-kisloroda-na-razvitie-pshenitsy> (дата обращения 07.04.2019)].
- Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. 2011. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1: Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 808 с.
- Гусев Е.М. 2012. Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчеты. Saarbrücken. Palmarium Academic Publishing. 124 с.
- Гусев Е.М. 2019. Неизбежность и перспективы использования человечеством стратегии «зеленого земледелия» // Аридные экосистемы. Т. 25. № 3 (80). С. 3-10. [Gusev E.M. 2019. Inevitability and Prospects of the Use of the “Green Farming” Strategy by Humanity // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 3. P. 143-149.]
- Гусев Е.М., Джоган Л.Я., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. 2021. Сценарное прогнозирование изменения влагообеспеченности посевов пшеницы в степном Крыму в XXI в. и ряд мер по увеличению

- эффективности ее возделывания // Почвоведение. № 5. С. 620-630.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. 2004. Проблемы изучения и моделирования тепло- и влагообмена в системе «почва – растительный / снежный покров – приземный слой атмосферы» // Водные ресурсы. Т. 31. № 2. С. 148-164.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. 2010. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука. 328 с.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. 2006. Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // Водные ресурсы. № 6. С. 664-676.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Айзель Г.В. 2018. Влияние возможного изменения климата на сток рек, расположенного в разных регионах земного шара // Метеорология и гидрология. № 6. С. 91-100.
- Иванов Н.Н. 1948. Ландшафтно-климатические зоны земного шара. М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР. 224 с.
- Изменение климата. 2012. Ежемесячный информационный бюллетень. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). № 33. 32 с.
- Ограничивающие факторы урожая пшеницы. Рост и развитие здорового пшеничного растения. 2011 [Электронный ресурс <https://www.zerno-ua.com/journals/2009/nyabr-2009-god/ogranichivayushchie-factoryurozhaya-pshenicy-rost-i-razvitie-zdorovogo-pshenichnogo-rasteniya> (дата обращения 10.04.2019)].
- Сергиенко В.Г., Константинов А.В. 2016. Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. № 2. С. 29-44.
- Слэйчер Р. 1970. Водный режим растений. М.: Мир. 365 с.
- ТАСС. Климатический хаос. 2017 [Электронный ресурс <http://tass.ru/spec/climate> (дата обращения 7.11.2017)].
- Australian Water Resources Assessment 2012. Australian Government. Bureau of Meteorology. 2012 [Электронный ресурс <http://www.bom.gov.au/water/awra/2012/> (дата обращения 03.03.2018)].
- Champeaux J.L., Masson V., Chauvin F. 2005. ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution // Meteorological Applications. No. 12. P. 29-32.
- EGA (European Climate Assessment). 2002. The European climate assessment and dataset. KNMI, Netherlands [Электронный ресурс <http://www.knmi.nl/samenw/> (дата обращения 4.11.2017)].
- Fernández A.M. 2016. River Basins and Water Management in Spain. Tagus and Ebro River Basin District: an account of their current situation and main problems. Study for the PETI Committee. European Parliament: Policy Department C: citizen's rights and constitutional affairs. Publications office. Brussels. 70 p.
- Gusev Ye., Novak V. 2007. Soil water – main water resources for terrestrial ecosystems of the biosphere // Journal of Hydrology and Hydromechanics. Vol. 55. No. 1. P. 3-15.
- Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Aizel G.V. 2018. Modelling river runoff and estimating its weather-related uncertainty for 11 large-scale rivers located in different regions of the globe // Hydrology Research. No. 49 (4). P. 1072-1087.
- Gusev E.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Ayzel G.V. 2019. Impact of Possible Climate Change on Extreme Annual Runoff from River Basins Located in Different Regions of the Globe // Water Resources. Vol. 46, Suppl. 1, P. S126-S136.
- IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York. 881 p.
- IPCC. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 582 p.
- IPCC. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland. 151 p.
- Jason A. 2019. Climate risks plague Murray Darling Basin reforms. Australia: RMIT University. [Электронный ресурс <http://www.globalwaterforum.org/2019/04/23/climate-risks-plague-murray-darling-basin-reforms/> (дата обращения 04.06.2019)].
- Krysanova V., Hattermann F.F. 2017. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results // Climatic Change. Vol. 141. P. 363-379.
- Literature Synthesis on Climate Change Implications for Water and Environmental Resources. 2013. Third Edition. Technical Service Center Water Resources Planning and Operations Support Group Water and Environmental Resources Division. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Research and Development Office Denver. Colorado. 227 p.
- Meleshko V.P., Govorkova V.A., Kattsov V.M., Malevskii-Malevich S.P., Nadezhina E.D., Sporyshev P.V., Golitsyn G.S., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.C. 2004. Anthropogenic climate change in Russia in the twenty-first century: an ensemble of climate model projections // Russian Meteorology and

Hydrology. No. 4. P. 22-30.

- Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emor S.i, Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque J.F., Manning M., MatthewsB., Meeh J.l, Meyer L., Mitchell J., Nakicenovic N., O'Neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., van Ypersele J.P., Zurek M.* 2008. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. 132 p.
- Spain's Tagus river is drying up. 2017 [Электронный ресурс <http://www.france24.com/en/20171212-focus-spain-river-tagus-drought-irrigation-agriculture-climate-water-management-transfers> (дата обращения 12.12.2017)].
- Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. 2010. Paris, France: OECD Publishing. 120 p.
- Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J.* 2014. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework // PNAS. Vol. 111. No. 9. P. 3228-3232.
- Weedon G.P., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth W.J., Blyth E., Österle H., Adam J.C., Bellouin O., Best M.* 2011. Creation of the WATCH Forcing Data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century // Journal of Hydrometeorology. Vol. 12. P. 823-848.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water. 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. Paris: UNESCO. 139 p.