

УДК 556.136.2+556.136.6

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ИСПАРЕНИЯ С СУШИ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

А.Н. Постников

Российский государственный гидрометеорологический университет, apostnikk@mail.ru

Приводятся оценки изменений испарения с суши и водной поверхности, которые произошли на территории России за последние десятилетия под влиянием изменений климата. Установлено, что изменения испарения с поверхности суши меняют знак по территории и составляют от нескольких единиц до нескольких десятков миллиметров, а испарение с водной поверхности увеличилось повсюду на 7—10 %. Произведены оценки вклада атмосферных осадков и температуры воздуха в формирование изменений испарения с поверхности суши в различных природных зонах.

Ключевые слова: изменение, испарение с воды и суши, вклады в испарение.

ABOUT EVAPORATION CHANGE FROM LAND AND WATER SURFACE ON THE TERRITORY OF RUSSIA FOR THE LAST DECADES

A.N. Postnikov

Russian State Hydrometeorological University

Evaporation changes from land and water surface that occurred on the territory of Russia within the last decades due to climate change are evaluated. It is established that changes in evaporation from land surface differ in sign on different areas and range from several units to several tens of millimeters whereas evaporation from water surface increased everywhere by 7—10 %. Contribution of precipitation and air temperature to the formation of changes in evaporation from land surface in different natural areas is estimated.

Keywords: change, evaporation from water and land, contributions in evaporation.

Введение

В 2014 г. Росгидрометом был опубликован второй Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [3], содержание которого свидетельствует, в частности, об изменениях в последнее время норм атмосферных осадков (P) и температуры воздуха (T), данные о которых могут быть использованы для оценки испарения с поверхности суши (E_c) и водной поверхности (E_b). Примеры подобных оценок можно найти, например, в работах [2, 4—7]. В настоящей работе предпринята попытка сравнения средних многолетних значений E_c и E_b , определенных по данным о средних многолетних значениях T и P за период последних примерно трех с половиной десятилетий (далее названный «второй период») и по значениям T и P , приведенным в Справочнике по климату СССР [9], где произведено обобщение результатов наблюдений за метеовеличинами приблизительно на уровень 1960 г. (далее «первый период»).

Исходные данные, состав исследований

Для выполнения поставленной задачи были необходимы данные о нормах годовых осадков (P) и месячной температуры воздуха (T) за первый и второй периоды. Данные об этих метеовеличинах в первом случае заимствовались из [9], а во втором — из базы данных ВНИИГМИ — МЦД [1]. При этом использовались данные об осадках с поправками на смачивание осадкомерного сосуда и на ветровой недоучет. Расчет среднего многолетнего годового испарения с поверхности суши (E_c , мм) проводился по формулам автора:

$$E_c = E_0(1 - e^{-z}) \quad (\text{мм}), \quad (1)$$

$$E_0 = 16,8(0,8 + 0,011t)(90 - 52e^{0,1(6-t)}) \quad (\text{мм}), \quad (2)$$

$$Z = \frac{P}{E_0} + \left(\frac{P}{E_0}\right)^2, \quad (3)$$

$$t = \frac{\sum T_i}{12} \quad (^\circ\text{C}), \quad (4)$$

где E_0 — норма годовой испаряемости, т.е. максимально возможного испарения с предельно увлажненной поверхности при данных метеоусловиях; T_i — норма температуры i -го месяца теплого периода года, к которому относились месяцы с $T_i \geq 0$ °C.

Таким образом, t есть норма суммы среднемесячных температур воздуха за теплый период, уменьшенная в 12 раз. При нормировочном множителе 12 в местности, где норма температуры за все месяцы года неотрицательна, t превращается в норму среднегодовой температуры воздуха. Далее t будем называть просто температурой.

Формулы (1) — (4) были апробированы в работе [7] при расчетах испарения с поверхности суши на территории РФ и показали достаточно удовлетворительную надежность. Относительные погрешности расчета в среднем по территории России по сравнению с данными карты испарения с поверхности суши для территории СССР, приведенной в [10], составили 7 %, а по сравнению с данными карты, приведенной в [8], 11,8 %.

В работе оценивались не только изменения нормы годового испарения (ΔE_c), но и вклад в его формирование осадков и температуры. Оценка вклада производилась следующим образом. Изменение испарения представлялось в виде

$$\Delta E_c = \left(\frac{\partial E_c}{\partial P}\right) \Delta P + \left(\frac{\partial E_c}{\partial t}\right) \Delta t \quad (\text{мм}), \quad (5)$$

где ΔP и Δt — изменение величин P и t между вторым и первым периодами. После дифференцирования уравнений (1) — (3) были получены следующие выражения:

$$\frac{\partial E_c}{\partial P} = \left(1 + \frac{P}{E_0}\right) e^{-z}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial t} = \frac{dE_0}{dt} \left[\frac{E_c}{E_0} - \left(\frac{P}{E_0} \right) \frac{\partial E_c}{\partial P} \right] \text{ (мм/°C)}, \quad (7)$$

$$\frac{dE_0}{dt} = 16,8 \left[0,99 + 4,01(1 + 0,01t)e^{0,11(6-t)} \right] \text{ (мм/°C)}. \quad (8)$$

Производные (6) — (8) вычисляются по значениям P и t за первый период, т.е. по данным [9]. Вклад P и t в формирование ΔE_c определялся в процентах по формулам соответственно

$$V_p = 100 \left| \frac{\partial E_c}{\partial P} \frac{\Delta P}{V} \right| \text{ (\%)}, \quad (9)$$

$$V_t = 100 \left| \frac{\partial E_c}{\partial t} \frac{\Delta t}{V} \right| \text{ (\%)}, \quad (10)$$

где

$$V = \left| \frac{\partial E_c}{\partial P} \Delta P \right| + \left| \frac{\partial E_c}{\partial t} \Delta t \right| \text{ (мм)}. \quad (11)$$

Для оценок испарения с поверхности водоемов суши (E_b) в целом за безледоставный период использовались две формулы:

$$E_b = 83t \text{ (мм)}, \quad (12)$$

$$E_b = 4(0,026t + 0,62)(21,3t + 27) \text{ (мм)}, \quad (13)$$

где t также определяется по формуле (4).

Формула (12) была получена путем непосредственного сопоставления величин E_b и t . Величины E_b были заимствованы из литературных источников [4]. Формула (13) была определена в результате анализа уравнения теплового баланса водоема [5], и на основе ее была построена карта испарения с водной поверхности для территории России [6].

Полученные результаты, их краткий анализ

В процессе исследования территория России подразделялась на четыре части: европейская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток. В табл. 1 представлены в основном крупные населенные пункты, по данным наблюдений в которых за температурой воздуха и атмосферными осадками проводились оценки изменений величин E_c и E_b . На каждой из названных частей страны было выбрано восемь — десять таких пунктов, более или менее равномерно распределенных по территории. Безусловно, такое незначительное число пунктов недостаточно для подробного описания полей изменений E_c и E_b , но такой цели в настоящей работе и не преследовалось. Автор стремился получить хотя бы общее, пусть достаточно схематичное, представление об изменениях E_c и E_b , происходивших в различных частях этих крупных регионов.

Таблица 1

Исходные данные и результаты исследований

Пункт	t , °C	Δt , °C	P , мм	ΔP , мм	ΔE_c , мм	δ_c , %	P/E_0	V_p , %	V_r , %	$\Delta E_{в^*}$, мм	$\delta_{в^*}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Европейская часть</i>											
Мурманск	3,7	0,2	575	82	24	8	1,77	32	68	17/14	5/5
Мезень	3,8	0,5	592	83	50	15	1,76	17	83	42/37	13/12
Петрозаводск	5,5	0,3	7,8	64	-3	-1	1,40	47	53	25/24	5/6
Петербург	6,4	0,8	673	25	37	7	1,14	24	76	66/69	12/13
Вологда	5,9	0,3	706	-91	-18	-4	1,30	63	37	25/25	5/5
Рязань	7,1	0,5	614	4	13	3	0,95	14	86	42/44	7/8
Казань	6,9	0,8	587	9	22	5	0,93	19	81	66/70	12/13
Пермь	6,1	0,4	821	-114	-16	-2	1,46	50	50	33/33	7/7
Волгоград	9,8	0,4	479	-44	-33	-7	0,56	94	6	33/40	4/5
Краснодар	11,1	1,1	711	49	42	7	0,76	72	28	91/118	10/12
Ставрополь	9,8	0,2	715	-83	-47	-8	0,84	94	6	17/20	2/2
Среднее							1,17	48	52	42/45	7/8
<i>Западная Сибирь</i>											
Салехард	3,2	0,2	585	-53	16	6	2,17	8	92	17/14	6/5
Октябрьское	4,4	0,4	592	41	34	9	1,48	23	77	33/30	9/9
Тюмень	6,4	0,2	524	10	10	2	0,89	53	47	17/17	3/3
Омск	6,5	0,6	374	99	74	22	0,63	92	8	50/51	9/10
Курган	6,8	0,5	467	-17	-5	-1	0,75	59	41	42/43	7/8
Томск	5,6	0,5	537	-42	5	1	1,23	3,6	64	42/41	9/9
Кемерово	5,8	0,6	476	90	60	15	0,89	77	23	50/50	10/11
Барнаул	6,7	0,5	613	-125	-57	-12	1,00	80	20	42/43	7/8
Среднее							1,13	53	47	37/36	8/8
<i>Восточная Сибирь</i>											
Игарка	3,2	0,4	705	-47	41	15	2,61	1	99	33/28	13/11
Кюсюр	2,6	0,2	420	45	23	12	2,09	8	92	17/14	8/6
Оленек	3,1	0,2	337	20	17	8	1,30	31	69	17/14	6/5
Оймякон	3,4	0,2	209	42	30	17	0,70	89	11	17/14	6/5
Якутск	5,1	0,3	247	38	32	14	0,53	94	6	25/24	6/6
Красноярск	6,2	0,0	372	170	100	30	0,65	100	0,0	0/0	0/0
Тура	4,0	0,3	396	24	22	7	1,11	42	58	25/22	8/7
Улан-Удэ	5,7	0,8	292	-11	-4	-1	0,56	58	42	66/66	14/15
Чита	5,6	0,4	367	9	11	4	0,71	51	49	33/33	7/7
Среднее							1,14	53	47	25/21	8/7
<i>Дальний Восток</i>											
Эньмувеем	2,7	0,4	345	-1	29	14	1,62	0	100	33/27	15/12
Омолон	2,9	0,7	305	-14	25	12	1,29	8	92	58/49	24/20
Островное	2,9	0,5	248	34	34	18	1,05	40	60	42/35	17/14
Среднеколымск	3,1	0,4	250	40	36	18	0,97	52	48	33/28	13/11

Окончание табл. 1

Пункт	t , °С	Δt , °С	P , мм	ΔP , мм	ΔE_c , мм	δ_c , %	P/E_0	V_p , %	V_p' , %	$\Delta E_{в'}$, мм	$\delta_{в'}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Оссора	3,3	0,4	1035	-290	42	15	3,68	0	100	33/28	12/10
Сеймчан	3,9	0,4	341	36	30	11	0,98	55	45	33/30	10/9
Экимчан	4,8	0,4	728	-20	77	22	2,04	1	99	33/31	8/8
Нелькан	4,7	0,4	446	-50	-13	-4	1,04	60	40	33/31	9/8
Петропавловск-Камчатский	4,5	0,2	1620	-323	20	5	3,96	0	100	17/15	4/4
им. Полины Осипенко	5,5	0,5	475	71	48	13	0,94	72	28	42/41	9/9
Южно-Сахалинск	5,8	0,3	909	48	26	5	1,70	22	78	25/25	5/5
Владивосток	7,4	0,2	813	150	49	8	1,21	86	14	17/18	3/3
Среднее							1,71	35	65	33/30	10/9

Результаты исследований приведены в табл. 1. Остановимся сначала на данных в столбцах 2—5, которые являются определяющими для остального содержания таблицы. Значения P и T определялись по данным за первый период, т.е. по Справочнику по климату СССР; при этом значения t рассчитывались по формуле (4). Величины ΔP и Δt есть разности соответственно осадков и температуры за второй и первый периоды.

Значения Δt положительны на всей территории страны, т.е. во второй период повсеместно произошло повышение температуры за месяцы теплого периода года. В то же время, значения ΔP знакопеременны, причем число знаков «плюс» и «минус» сопоставимо на большей части страны; исключение составляет только Восточная Сибирь, где положительные значения ΔP преобладают. При этом достоверность значений ΔP вызывает некоторые сомнения, хотя бы по отдельным пунктам. Так, например, для пар пунктов, расположенных сравнительно недалеко друг от друга, таких как Санкт-Петербург и Вологда, Ставрополь и Краснодар, Кемерово и Барнаул, величины ΔP различаются как по знаку, так и по значению, причем на многие десятки миллиметров (см. табл. 1, столбец 5). Возможно, это связано с тем, что методика определения осадков в нашей стране неоднократно изменялась [11], и поэтому к настоящему времени еще не удалось сделать ряды годовых сумм осадков однородными, по крайней мере для отдельных пунктов. Отсюда следует, что мы не можем полностью доверять данным по осадкам, и с учетом этого к последующим оценкам изменений испарения следует относиться с осторожностью.

В столбце 6 приводятся абсолютные изменения испарения с поверхности суши (ΔE_c , мм) между вторым и первым периодами. При этом сочетание отрицательных значений ΔE_c и отрицательных значений ΔP соответствует пунктам, где испарение заметно меньше испаряемости по причине недостатка осадков. При количестве осадков, обеспечивающем примерное равенство $E_c \approx E_0$, их некоторое уменьшение не определяет ΔE_c как величину отрицательную и может только привести

к уменьшению ее значения. Изменчивость знака ΔE_c особенно заметно проявляется на европейской части России, на территории остальных регионов преобладают положительные значения этой величины. В большинстве случаев по абсолютному значению величина ΔE_c составляет несколько десятков миллиметров.

Наименьшая относительная изменчивость испарения (столбец 7) наблюдается на европейской части России, где она, как правило, по абсолютному значению не превышает 10 %. По направлению на восток она увеличивается, преобладают ее положительные значения, которые изменяются в диапазоне от единиц до двух десятков процентов. При этом наибольшие значения δ_c приходятся на пункты либо с низким значением испарения за первый период, либо с большим изменением количества осадков ΔP .

Все сказанное позволяет сделать вывод о том, что во втором периоде на большей части Сибири и Дальнего Востока произошло увеличение испарения с поверхности суши в пределах, указанных выше. Об изменениях испарения на европейской части можно сказать только, что они переменны по знаку по территории, причем знак определяется в основном величиной ΔP .

Вклад температуры и осадков в изменение испарения определялся с применением формул (6) — (11). Из этих формул следует, что вклад обеих величин является сложной функцией переменных t , P/E_0 , ΔP , Δt . По первой паре этих переменных в формуле (5) вычисляются значения производных $\partial E_c / \partial P$ и $\partial E_c / \partial t$, которые характеризуют состояние объектов в первом периоде (начальное состояние). За изменение этого состояния отвечают величины ΔP и Δt — характеристики объектов второго периода.

Проследим изменения производных в зависимости от изменений их аргументов. Производная $\partial E_c / \partial P$ зависит только от отношения P/E_0 . Эта зависимость в пределах изменений отношения P/E_0 , встречающихся в данной работе, представлена на рис. 1.

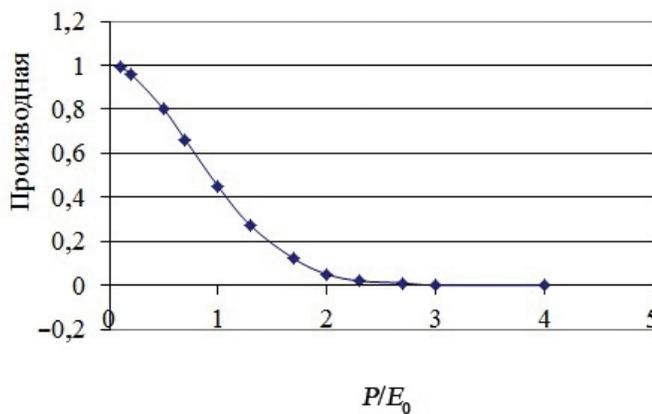


Рис. 1. Зависимость производной $\partial E_c / \partial P$ от отношения P/E_0 .

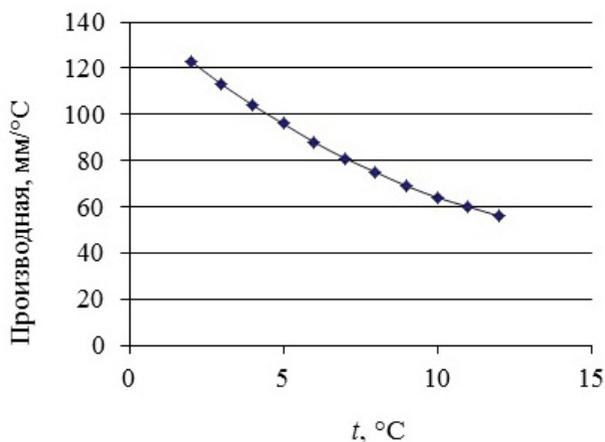


Рис. 2. Зависимость производной dE_0/dt от t .

Мы видим, что производная $\partial E_c/\partial P$ быстро убывает при увеличении P/E_0 . Наибольшие ее значения характерны для южных районов с незначительным увлажнением, а наименьшие — для северных (зона избыточного увлажнения). При анализе формулы (7) можно убедиться в том, что при увеличении P/E_0 $E \rightarrow E_0$ и $\partial E_c/\partial t \rightarrow dE_0/dt$.

На рис. 2 представлена зависимость dE_0/dt от t в соответствии с формулой (8). Эта зависимость показывает, что изменение значения t на 1°C приводит к изменению испаряемости на многие десятки миллиметров.

Из рис. 2 видно, что значения производной dE_0/dt с уменьшением t заметно возрастают. Поскольку при этом $\partial E_c/\partial t \rightarrow dE_0/dt$, то в области низких значений t (северные районы) значения производной $\partial E_c/\partial t$ будут максимально высокими, а в области высоких значений t (южные районы) — максимально низкими. Итак, по состоянию на начало периода изменений (второго периода) можно ожидать, что вклад V_i будет наибольшим в северных районах и наименьшим в южных, и, наоборот, вклад V_p — наименьшим в северных районах и наибольшим в южных. Действительно, такая тенденция прослеживается довольно отчетливо по данным, приведенным в столбцах 9 и 10 табл. 1. Однако эти ожидания могут быть скорректированы влиянием переменных ΔP и Δt . Так, например, большие значения ΔP могут обуславливать повышение вклада V_p и снижение вклада V_i , а большие значения Δt , наоборот, повышение вклада V_i и снижение вклада V_p . С учетом сказанного и следует проводить анализ величин V_p и V_i (при этом может быть полезна табл. 2).

Таблица 2

Факторы, способствующие увеличению вклада V_p и V_i				
V_i	$-t$	$+P/E_0$	$+\Delta t$	$- \Delta P $
V_p	$+t$	$-P/E_0$	$-\Delta t$	$+ \Delta P $

В табл. 2 знак «плюс» соответствует словам «большие значения», а знак «минус» — словам «малые значения». При этом надо иметь в виду, что факторы, способствующие росту вкладов, могут не проявляться все сразу. Например, в пункте Волгоград все факторы оказались «работающими» на повышение вклада V_p , а в пунктах Рязань и Казань, несмотря на достаточно высокую температуру и небольшие значения P/E_0 , значения V_i были достаточно высоки (см. табл. 1), потому что приращения Δt оказались довольно большими, а приращения ΔP — очень малыми. Подсчет средних значений V_p и V_i показывает, что они сопоставимы во всех регионах страны, т.е. температура теплого периода и ее изменения, а также осадки и их изменения в среднем по территории страны равноправны в формировании изменений испарения с поверхности суши.

Результаты расчета изменений испарения с водной поверхности представлены в последних столбцах табл. 1. В столбце 11 приводятся данные об абсолютных изменениях (ΔE_b), которые получены как разности значений испарения за второй и первый период, определенные в числителе по формуле (12), а в знаменателе — по формуле (13). Относительное изменение (δ_b) представляет собой отношение $\Delta E_b/E_b$, выраженное в процентах, где E_b — испарение с водной поверхности за первый период (столбец 12).

Значения числителей указанных отношений определены с использованием формулы (12), а знаменателей — формулы (13). Изменение испарения в соответствии с формулами (12) и (13) полностью определяется величиной Δt , которая во всех пунктах положительна, и поэтому изменение испарения везде оказалось положительным. Расчеты по формулам (12) и (13) дают очень близкие результаты, согласно которым во втором периоде произошло увеличение испарения с водной поверхности на европейской части России и в Сибири на 7—8 %, а на территории Дальнего Востока — на 9—10 %. Некоторое повышение величины δ_b в последнем регионе объясняется тем, что здесь абсолютные отклонения ΔE_b примерно такие же, как в других регионах, а среднее по территории испарение за первый период несколько меньше.

Заключение

Сравнение средних многолетних значений температуры воздуха и количества атмосферных осадков, приведенных в работе [9] на уровень 1960 г. (первый период), с аналогичными данными за период 1980—2015 гг. (второй период) и полученные на основе этого сравнения результаты изменения среднего многолетнего испарения с поверхности суши и водной поверхности позволяют сделать следующие выводы.

1. Во втором периоде по сравнению с первым на всей территории страны произошло увеличение необходимой для расчетов испарения температуры воздуха за теплый период года (далее температура).

2. Изменение количества осадков носит знакопеременный характер; при этом в распределении знака по территории не прослеживается какой-либо закономерности, что, может быть, отчасти связано с недостатками методики определения количества осадков.

3. Знак изменения испарения с поверхности суши также изменяет по территории и совпадает со знаком изменения количества осадков. Исключение составляют случаи, когда отношение P/E_0 , характеризующее степень увлажненности территории, превышает единицу (зона избыточного увлажнения). Значения изменения слоев испарения по всем регионам сравнимы друг с другом и колеблются от единиц до нескольких десятков миллиметров. Увеличение испарения относительно первого периода в среднем по территории европейской части России и Сибири составляет 7—8 %, а на Дальнем Востоке, где сама величина испарения несколько ниже, чем на остальной части России, — 11 %.

4. Вклад осадков (V_p) и температуры (V_t) в формирование изменений испарения с поверхности суши примерно одинаков в среднем по территории европейской части России, Западной Сибири и Восточной Сибири. Исключением является территория Дальнего Востока, где V_p составляет только 35 % при вкладе V_t , равном 65 %. Вклад V_t высок в северных районах и в районах с высокими значениями отношения P/E_0 , где он может составлять 70—90 % и даже 100 %. Вклад V_p высок в южных районах и в районах с пониженными значениями P/E_0 , а также при больших изменениях количества осадков.

5. Изменение испарения с водной поверхности, оцененное по двум формулам, повсеместно имеет положительный знак. Увеличение испарения за второй период составляет 7—8 % на территории европейской части России и Сибири и 9—10 % на Дальнем Востоке.

Список литературы

1. Доступ к данным ВНИИГМИ — МЦД. meteo.ru/data.
2. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Гурьянов Л.А.* Малопараметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современных изменений климата // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 37—49.
3. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // downloads.ru>Publication>2014>1.htm.
4. *Постников А.Н.* Приближенный метод оценки испарения с озер и водохранилищ // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 13. С. 21—29.
5. *Постников А.Н.* Оценка норм испарения за безледоставный период с озер и водохранилищ России и отдельных стран СНГ методом теплового баланса // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 26. С. 25—33.
6. *Постников А.Н.* О распределении испарения с водной поверхности на территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 22—28.
7. *Постников А.Н.* Об использовании различных уравнений связи для определения норм годового испарения // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 46. С. 35—42.
8. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 96 с.
9. Справочник по климату СССР. Вып. 1—34. Л.: Гидрометеоздат, 1966—1968.
10. Указания по расчету испарения с поверхности суши (проект). Фотоофсетная лаборатория ВНИГЛ ГГИ. 1970. 133 с.
11. *Швер Ц.А.* Атмосферные осадки на территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 302 с.