

УДК 556

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРБАНИЗАЦИИ НА ГОДОВОЙ СТОК И КАЧЕСТВО ВОД В МИРЕ И НА КОНТИНЕНТАХ

© 2022 г. Н. И. Коронкевич^а, *, Е. А. Барабанова^а, И. С. Зайцева^а, К. С. Мельник^а

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: koronkevich@igras.ru

Поступила в редакцию 08.09.2021 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 12.02.2022 г.

Рассмотрено растущее влияние урбанизации на средний годовой речной сток континентов (частей света), России и мира в целом, а также на качество вод. Оценивается влияние двух аспектов урбанизации. Один из них — влияние урбанизированных ландшафтов, значительную часть которых составляют населенные пункты, дороги. На занимаемой ими площади, зачастую загрязненной, наблюдается резкое снижение водопроницаемости и увеличение поверхностного и общего стока. Другой аспект — коммунальное и промышленное водопотребление, связанное с изъятием, отчасти безвозвратным, водных ресурсов и со сбросом в реки и водоемы сточных вод, в значительной мере загрязненных. Показано, что для большинства рассматриваемых регионов и мира в целом и современное увеличение стока с урбанизированных ландшафтов, и его уменьшение в результате водопотребления составляет десятки и даже сотни кубических километров в год, хотя и то и другое влияние сравнительно невелико по отношению к располагаемым водным ресурсам. На наиболее обжитой части территории суммарное влияние урбанизации на сток выражено более существенно, причем, как правило, преобладает общее увеличение стока. Гораздо большее влияние урбанизация оказывает на качество воды, так как разбавление сточных вод и загрязненных вод, поступающих с урбанизированных территорий, явно недостаточно.

Ключевые слова: урбанизированные территории, полное и безвозвратное водопотребление, годовой сток, сточные воды, кратность разбавления, мир, континенты, Россия

DOI: 10.31857/S2587556622030098

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация представляет собой исторический процесс разрастания городских территорий, увеличения численности их населения и роли в развитии общества (Реймерс, 1990; и др.). Урбанизированные территории включают в себя как практически водонепроницаемые участки (крыши домов, асфальтированные дороги), так и относительно слабоводопроницаемые участки (газоны, парки), почва которых сильно уплотнена. Наличие участков с пониженной инфильтрационной способностью характерно и для сельских населенных пунктов, особенно современных, которые все в большей мере приобретают городские черты. Отсутствие инфильтрации или слабая ее интенсивность приводят, как давно уже показали исследования ряда территорий в нашей стране и в мире (Куприянов, 1977; Курбатова, 2004; Львович, 1986; Львович, Черногаева, 1978; Львович, Чернышёв, 1983; Устюжанин, 1989; Angel et al., 2012; Choe et al., 2002; Li et al., 2018; Espey et al., 1966), к увеличению поверхностного стока, снижению подземного, и, в целом, к увеличению

суммарного речного стока, хотя оценки у разных авторов существенно отличаются. Существует мнение, что над городами, особенно большими, возрастает количество атмосферных осадков, но этот вопрос остается дискуссионным. Авторами данной статьи также были выполнены расчеты влияния урбанизированных территорий на сток ряда регионов и речных бассейнов (Коронкевич, Мельник, 2015, 2019; и др.). В развитие этих работ в (Коронкевич и др., 2020) впервые дана оценка влияния урбанизированных территорий на годовой сток России, крупных регионов мира и мира в целом без учета водопотребления в их пределах. Результаты этого обобщения с некоторыми коррективами использованы в данной статье при оценке суммарного влияния урбанизации на речной сток и качество вод, то есть уже с учетом водопотребления в коммунальном хозяйстве и в промышленности. Заметим, что нам известна только одна работа, посвященная такой комплексной оценке, — это работа Б.С. Устюжанина (1989), выполненная применительно к центральной части Русской равнины. Что касается оценки водопотребления в различных регионах мира, то

ей посвящено большое число публикаций. Однако лишь малая часть из них освещает ситуацию в мире в целом и на континентах (частях света), а если освещает (Голиков, Казакова, 2018; Калинин, 1968; Львович, 1974; Шикломанов, 1988; Andressian, 1994; Falkenmark and Lindth, 1974; Margat, 1994; Rodda, 1995; World ..., 2003; и др.), то, как правило, за далекие от современных годы, с большим расхождением в методике получения результатов и оценках за одни и те же периоды, часто без учета безвозвратного водопотребления (безвозвратного расхода воды).

Цель данной статьи — оценить совокупное влияние двух аспектов урбанизации на изменение речного стока в мире, на континентах и в России, а также их влияние на качество вод в этих регионах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы и методы оценки влияния урбанизированных ландшафтов на сток подробно изложены в (Коронкевич и др., 2020). Здесь же отметим, что для расчета общей современной площади урбанизированных территорий использованы данные, агрегированные из различных статистических справочников, в том числе данные Института политики землепользования Линкольна¹, картографические данные масштабного проекта OpenStreetMap², снимков Landsat³ и ряда других, а также графики связи площади урбанизированных территорий с численностью населения.

Расчет изменения стока велся сначала для наиболее обжитой части территории, поскольку к ней в основном приурочены урбанизированные территории. За наиболее обжитую часть в основном приняты территории с плотностью населения более 1 человека на 1 км². Для нее графическим способом по картам изолиний стока, представленным в (Атлас ..., 1974), были найдены средний годовой слой и объем стока. В полученные таким образом величины стока с наиболее обжитой части территории вводились поправочные коэффициенты по влиянию урбанизированных ландшафтов (без учета возможного увеличения количества атмосферных осадков). В соответствии с нашими предыдущими исследованиями (Коронкевич, Мельник, 2015, 2019; и др.), принято, что один процент увеличения современной площади урбанизированных территорий увеличивает сток с площади крупных агломераций тоже на один процент, а сток с площади небольших городов и других населенных пунктов и дорог между ними — на 0.5%. Последняя ве-

личина использована и для расчета стока с площади урбанизированных территорий до середины XX столетия. А для расчета стока с “новой” площади урбанизированных территорий (после середины XX столетия) средняя величина увеличения стока принята в размере 0.75% при увеличении соответствующей площади на 1%. По полученным объемам изменения стока для наиболее обжитой территории определялось процентное изменение стока как по отношению к стоку с наиболее обжитой части рассматриваемых регионов, так и к стоку со всей их территории.

В статье (Коронкевич и др., 2020) для мира и континентов оценивалось изменение нормы стока, указанной в (Мировой ..., 1974), а для России — в (Воскресенский, 1962). В данной статье использовалась норма стока, приведенная в (Водные ..., 2008).

В основу расчетов водопотребления положены прогнозные оценки полного водопотребления (водозабора) и безвозвратного расхода воды в коммунальном секторе и в промышленности в мире и на континентах, выполненные в ГГИ на 2010 и 2025 гг., для двух сценариев (Водные ..., 2008). Один из них, “условный сценарий” (УС), предполагает развитие водопотребления по модели предшествующих десятилетий. Второй сценарий “устойчивого развития” (СУР) исходит из существенного повышения эффективности и более экономного использования водных ресурсов.

Оценка современного водопотребления (на уровне 2017 г.) на континентах и в мире выполнена нами следующим образом. Определены средние значения по каждому сценарию за 2010 и 2025 гг. (варианты 1 и 2), предположительно соответствующие водопотреблению на уровне 2017 г., и вычислено среднее из вариантов 1 и 2 (вариант 3).

Для оценки достоверности наших расчетов привлечены статистические данные по отдельным странам, помещенные в различных ежегодных отчетах международных организаций (WWAP, 2019; United ..., 2021), а также в глобальной информационной системе Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) по водным ресурсам и использованию воды⁴. Эта система предоставляет свободный доступ ко многим показателям и индикаторам по каждой стране с 1960 по 2017 г. В этих данных часто приводятся устаревшие сведения, как правило, не учитываются безвозвратный расход воды, потери воды на дополнительное испарение с акватории водохранилищ. Тем не менее они могут служить ориентиром при оценке достоверности различных обобщений и прогнозов водопотребления.

¹ <http://www.atlasofurbanexpansion.org> (дата обращения 04.07.2020).

² <http://download.geofabrik.de/> (дата обращения 04.07.2020).

³ <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 04.07.2020).

⁴ www.fao.org/aquastat/en/ (дата обращения 27.07.2021).

Таблица 1. Площадь урбанизированных территорий и увеличение годового стока

Показатель	Единица измерения	Зарубежная Европа	Зарубежная Азия	Африка	Северная Америка	Южная Америка	Австралия и Океания	Россия	Мир
Общая площадь региона	млн км ²	6.5	30.4	30.1	24.2	17.8	8.9	17.1	135
Площадь наиболее обжитой территории	млн км ²	5.2	12.2	15	9.7	8	1.4	4.4	55.9
Современная площадь урбанизированных территорий	млн км ²	0.75	1.37	0.27	1.07	0.34	0.05	0.19	4.04
	% общей площади	11.5	4.5	0.9	4.4	1.9	0.6	1.1	3.0
	% наиболее обжитой территории	14.4	11.2	1.8	11.0	4.3	3.6	4.3	7.2
Средний многолетний сток с общей площади региона	км ³ /год	2010	10280	4050	7890	12030	2404	4118	42782
Средний многолетний сток с наиболее обжитой территории	км ³ /год	1293	3050	3010	2619	2400	348	701	13421
Увеличение стока	км ³ /год	140	257	41	217	77	9	23	764
	% общего стока	7.0	2.5	1.0	2.8	0.6	0.4	0.6	1.8
	% стока с обжитой территории	10.8	8.4	1.4	8.3	3.2	2.6	3.3	5.7

Таблица 2. Фактическое (2000 г.) и прогнозное водопотребление в мире в коммунальном и промышленном секторах, км³/год

Сектор	Статья водопотребления	2000 г.	УС		СУР		УС 2017 г. (вариант 1)	СУР 2017 г. (вариант 2)	Среднее из УС и СУР 2017 г. (вариант 3)
			2010 г.	2025 г.	2010 г.	2025 г.			
Коммунальный	Полное	384	472	607	422	456	539	439	489
	Безвозвратное	53	61	74	61	63	67	62	65
	Объем сточных вод	331	411	533	361	393	472	377	424
Промышленный	Полное	776	908	1170	731	673	1039	702	871
	Безвозвратное	88	117	169	97	113	143	105	124
	Объем сточных вод	688	791	1001	634	560	896	597	747
Всего	Полное	1160	1380	1777	1153	1129	1578	1141	1360
	Безвозвратное	141	178	243	158	176	210	167	189
	Объем сточных вод	1019	1202	1534	995	953	1368	974	1171

Водопотребление в России, в том числе на европейской (ЕТР) и азиатской (АТР) ее территориях, определено на основании (Водные ..., 2019). При этом полное водопотребление в отдельных

секторах экономики находилось по данным об использовании воды с учетом ее потерь на транспортировку к месту назначения, которые составляют в среднем 10% водозабора, а безвозвратный

Таблица 3. Прогнозное водопотребление на континентах, км³/год

Сектор	Статья водопотребления	УС		СУР		УС 2017 г. (вариант 1)*	СУР 2017 г. (вариант 2)*	Среднее из УС и СУР 2017 г. (вариант 3)*
		2010 г.	2025 г.	2010 г.	2025 г.			
Европа								
Коммуналь- ный	Полное	75	78	65	59	77/71	62/56	69/63
	Безвозвратное	10	10	9	8	10/9	9/8	9/8
	Объем сточных вод	65	68	56	51	67/62	53/48	60/55
Промыш- ленный	Полное	242	256	169	119	249/224	144/119	196/171
	Безвозвратное	46	57	37	44	51/48	41/38	46/43
	Объем сточных вод	196	199	132	75	198/176	103/81	150/128
Всего	Полное	317	334	234	178	326/295	206/175	265/234
	Безвозвратное	56	67	46	52	61/57	50/46	55/51
	Объем сточных вод	261	267	188	126	265/238	156/129	210/183
Азия								
Коммуналь- ный	Полное	229	309	195	228	269/267	211/209	240/238
	Безвозвратное	28	36	28	31	32/32	30/30	31/30
	Объем сточных вод	201	273	167	197	237/235	181/179	209/208
Промыш- ленный	Полное	295	496	269	317	396/387	293/284	344/335
	Безвозвратное	44	77	35	39	61/60	37/36	49/48
	Объем сточных вод	251	419	234	278	335/327	256/248	295/287
Всего	Полное	524	805	464	545	665/654	504/493	584/573
	Безвозвратное	72	113	63	70	93/92	67/66	80/78
	Объем сточных вод	452	692	401	475	572/562	437/427	504/495
Африка								
Коммуналь- ный	Полное	35	61	36	57	48	46	47
	Безвозвратное	4	7	5	8	5	7	6
	Объем сточных вод	31	54	31	49	43	39	41
Промыш- ленный	Полное	12	20	17	27	16	22	19
	Безвозвратное	2	3	2	3	2	3	3
	Объем сточных вод	10	17	15	24	14	19	16
Всего	Полное	48	81	53	84	64	69	66
	Безвозвратное	6	10	7	11	7	10	9
	Объем сточных вод	41	71	46	73	57	58	57
Северная Америка								
Коммуналь- ный	Полное	102	114	89	70	108	79	94
	Безвозвратное	13	14	13	10	14	11	12
	Объем сточных вод	89	100	76	60	94	68	82
Промыш- ленный	Полное	307	325	236	162	316	199	257
	Безвозвратное	19	20	18	18	20	18	19
	Объем сточных вод	288	305	218	144	296	181	238
Всего	Полное	409	439	325	232	424	278	351
	Безвозвратное	32	34	31	28	34	29	31
	Объем сточных вод	377	405	294	204	390	249	320

Таблица 3. Окончание

Сектор	Статья водопотребления	УС		СУР		УС 2017 г. (вариант 1)*	СУР 2017 г. (вариант 2)*	Среднее из УС и СУР 2017 г. (вариант 3)*
		2010 г.	2025 г.	2010 г.	2025 г.			
Южная Америка								
Коммуналь- ный	Полное	43	59	35	39	51	37	44
	Безвозвратное	6	7	5	5	6	5	6
	Объем сточных вод	37	52	30	34	45	32	38
Промыш- ленный	Полное	42	62	35	45	52	40	46
	Безвозвратное	5	10	4	7	8	6	7
	Объем сточных вод	37	52	31	38	44	34	39
Всего	Полное	85	121	70	84	103	77	90
	Безвозвратное	11	17	9	13	14	11	12
	Объем сточных вод	74	104	61	72	89	66	77
Австралия и Океания								
Коммуналь- ный	Полное	4	4.5	3.5	3.4	4.3	3.4	3.8
	Безвозвратное	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Объем сточных вод	3.5	4	3	2.9	3.8	2.9	3.3
Промыш- ленный	Полное	8.8	10.3	5.9	4.8	9.6	5.4	7.5
	Безвозвратное	1.1	1.4	0.9	1.2	1.2	1.1	1.1
	Объем сточных вод	7.7	8.9	5	3.6	8.4	4.3	6.4
Всего	Полное	12.8	14.8	9.4	8.2	13.9	8.8	11.3
	Безвозвратное	1.6	1.9	1.4	1.7	1.7	1.6	1.6
	Объем сточных вод	11.2	12.9	8	6.5	12.2	7.2	9.7

Примечание. * Для Европы и Азии числитель — водопотребление в целом для этих континентов, знаменатель — водопотребление без европейской и азиатской территорий России.

расход воды — исходя из его доли в водозаборе (Водные ..., 2008), которая в коммунальном секторе равна 20%, а в промышленности — 11%.

Сопоставлением рассчитанных безвозвратных расходов воды с величиной ресурсов речного стока по (Водные ..., 2008) оценивалось изменение годового речного стока в результате безвозвратных изъятий воды. По разнице полного и безвозвратного изъятия воды определялся объем сточных вод.

По разнице увеличения речного стока под влиянием урбанизированных территорий и его уменьшения в результате водопотребления находилось совокупное изменение стока. Суммой стока с урбанизированных площадей и объема сточных вод определялись общий объем вод, оказывающих негативное влияние на водные экосистемы, и общая кратность их разбавления как ориентировочный показатель качества воды в рассматриваемых регионах.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из табл. 1, современная площадь урбанизированных территорий в мире составляет 4 млн км² (3% общей площади без Антарктиды). Наибольшая площадь урбанизированных территорий располагается в Зарубежной Азии и Северной Америке, наименьшая — в Австралии и Океании, России и Африке. Наиболее высока их доля в Зарубежной Европе (около 12% общей площади и более 14% наиболее обжитой части), а в Австралии и Океании, России и Африке их доля в общей площади относительно мала — около 1%. Общее увеличение стока под влиянием урбанизированных площадей составляет в мире более 760 км³/год, что в три раза превышает сток Волги, хотя по сравнению с общемировым стоком это сравнительно небольшая величина — 1.8%, но 5.7% в наиболее обжитой части. Наибольшее увеличение общего стока под влиянием урбанизированных территорий наблюдается в Зарубежной Азии и Северной Америке (более 200 км³), а в относительном изме-

Таблица 4. Водопотребление в России в коммунальном секторе и в промышленности в 2017 г., км³

Сектор	Статья водопотребления	ЕТР	АТР	Россия
Коммунальный	Полное	6.5	2.1	8.6
	Безвозвратное	1.3	0.4	1.7
	Объем сточных вод	5.2	1.7	6.9
Промышленный	Полное	24.8	8.7	33.5
	Безвозвратное	2.7	1.0	3.7
	Объем сточных вод	22.1	7.7	29.8
Всего	Полное	31.3	10.8	42.1
	Безвозвратное	4.0	1.4	5.4
	Объем сточных вод	27.3	9.4	36.7

рении — в Европе (7%). Наименьшее увеличение общего стока — в России, Австралии и Океании, Южной Америке (0.4–0.6%). Сток с наиболее обжитой территории изменился больше всего в Зарубежной Европе (около 11%), в Африке же — менее чем на 1.5%.

Как показано в (Коронкевич, Мельник, 2019) в бассейнах рр. Шпре, Москвы, Сены прибавка стока за счет урбанизации ландшафтов составляет в среднем 10%, а в бассейне Темзы — 20%.

Сведения по водопотреблению в мире в коммунальном секторе и в промышленности в 2000 г. и прогнозируемые ГГИ на 2010 и 2025 гг., а также рассчитанные нами на их основе на 2017 г., представлены в табл. 2. В табл. 3 приведены прогнозные сценарии ГГИ и наши расчеты по трем вариантам для континентов. В Европе и Азии учтено и водопотребление на ЕТР и АТР на основании данных (Водные ..., 2019). Отдельно водопотребление в России в 2017 г., в том числе для ЕТР и АТР, представлено в табл. 4. Для сравнения по миру и континентам в табл. 5 приведены данные ФАО по водопотреблению на уровне 2017 г.

Анализ представленного материала свидетельствует о том, что наиболее близкие результаты к данным ФАО по суммарному полному водопотреблению в мире дают второй и третий варианты расчета. Однако и первый вариант расчета не следует игнорировать, тем более что по отдельным континентам имеются существенные расхождения в величине водопотребления. О том, насколько эти расхождения

скажутся на величине безвозвратного расхода и кратности разбавления сточных вод, будет сказано ниже.

Как видно из табл. 2, около 2/3 суммарного мирового водопотребления (без учета сельского хозяйства, потерь воды на дополнительное испарение с акватории водохранилищ) приходится на нужды промышленности, а несколько более 1/3 — коммунального хозяйства. По сравнению с уровнем 2000 г. полное водопотребление в коммунальном секторе возросло к 2017 г. по разным вариантам расчетов в 1.1–1.4 раза, а в промышленности по первому и третьему вариантам — в 1.1–1.3, снизившись по второму варианту за счет мер по экономии воды в 1.1 раза.

По всем вариантам расчетов первое место по всем показателям водопотребления занимает Азия. На нее приходится более 40% полного мирового водопотребления на промышленные и коммунальные нужды, а также безвозвратного расхода и объема сточных вод, далее следуют Северная Америка и Зарубежная Европа. Доля России составляет примерно 3% полного мирового водопотребления и 2–3% безвозвратного расхода воды.

Для суждения о влиянии на величину годового стока наиболее важны данные по безвозвратному расходу воды. Они свидетельствуют о том, что безвозвратно на нужды коммунального хозяйства и промышленности изымается сравнительно небольшая часть мировых водных ресурсов. В мире в целом — 0.4–0.5% среднего многолетнего стока, в Зарубежной Европе — 2.4–2.6%, в Зарубежной Азии — 0.6–0.9%, в Северной Америке — около 0.3%. Еще меньше эта доля на других континентах. В России она составляет немногим более 0.1%. Несколько больше эта доля по отношению к стоку с наиболее обжитой части регионов. Посмотрим, насколько расхождения (см. табл. 2, 3, 5) между результатами прогнозных расчетов и данными ФАО в оценке полного водопотребления оказывают влияние на величину безвозвратного расхода воды. Так, по третьему варианту, при разнице водопотребления по сравнению с данными ФАО по миру суммарно в коммунальном секторе и в промышленности — 230 км³ (1360–130) и доле безвозвратного водопотребления 13% (см. табл. 2) разница составляет около 32 км³/год (13.9% от

Таблица 5. Полное водопотребление в 2017 г. по данным ФАО, км³/год

Сектор	Европа	Азия	Африка	Северная Америка	Южная Америка	Австралия и Океания	Мир
Коммунальный	57	247	34	85	38	5	465
Промышленный	134	236	16	251	24	4	665
Всего	191	483	50	336	62	9	1130

Таблица 6. Общее изменение стока в результате урбанизации

Регион	УС 2017 г. (вариант 1)			СУР 2017 г. (вариант 2)			Среднее из УС и СУР 2017 г. (вариант 3)		
	км ³	% от общего стока	% от стока с наиболее обжитой территории	км ³	% от общего стока	% от стока с наиболее обжитой территории	км ³	% от общего стока	% от стока с наиболее обжитой территории
Зарубежная Европа	83	4.1	6.4	94	4.7	7.3	89	4.4	6.9
Зарубежная Азия	165	1.6	5.4	191	1.9	6.3	179	1.7	5.9
Африка	34	0.8	1.1	31	0.8	1.0	32	0.8	1.1
Северная Америка	183	2.3	7.0	188	2.4	7.2	186	2.4	7.1
Южная Америка	63	0.5	2.6	66	0.5	2.8	65	0.5	2.7
Австралия и Океания	7	0.3	2.3	7	0.3	2.3	7	0.3	2.3
Мир*	553	1.3	4.1	596	1.4	4.4	574	1.3	4.3

Примечание. * С учетом России. В России в 2017 г. общее увеличение стока в результате урбанизации оценивается в 17.8 км³/год (0.4% общего стока и 2.5% стока с наиболее обжитой территории).

230 км³). Следовательно, по отношению к речному стоку мира (42782 км³/год) это меняет нашу оценку всего на 0.008%. Аналогичные расчеты для отдельных континентов дают тот же порядок расхождения, кроме Европы, где оно оценивается в 0.53%. Расхождение данных ФАО с другими вариантами, особенно со вторым, дают близкие величины, которые не влияют сколько-нибудь существенно на наши оценки изменения стока в результате водопотребления на коммунальные и промышленные нужды, а также на кратность разбавления сточных вод.

При оценке влияния водопотребления на сток следует иметь в виду, что часть воды изымается не из рек, а из подземных горизонтов, из морей, бессточных водоемов. Но, как представляется, это не очень существенно влияет на приведенные оценки изменения стока, поскольку в значительной мере, если не полностью, компенсируется тем, что в районах подземного водозабора происходит усиленная фильтрация речных вод, а оценки безвозвратного изъятия занижены из-за не учета дополнительного испарения обычно нагретых сточных вод. Впрочем, данный вопрос нуждается в специальном исследовании.

Сопоставление безвозвратного расхода воды с воздействием на сток урбанизированных ландшафтов свидетельствует о значительном превышении доли последнего, то есть о преобладающей его роли в изменении стока, а, следовательно, об общем увеличении стока под влиянием урбанизации. Итоговое изменение стока представлено в табл. 6. Как видно, общее мировое увеличение стока в результате урбанизации оценивается в диапазоне от 553 до 596 км³/год (1.3–1.4% общего стока и 4.1–4.4% стока с наиболее обжитой части территории). По объему изменения стока выде-

ляются Зарубежная Азия и Северная Америка (от 165 до 191 км³/год). Наибольшее увеличение стока в процентах от общего имеет место в Зарубежной Европе (4.4–6.4) и Северной Америке (2.3–2.4), как и в процентах от стока наиболее обжитой территории (соответственно 6.9–7.3 и 7.0–7.1). Остальные континенты и Россия характеризуются значительно меньшим влиянием урбанизации на годовой сток, хотя в отдельных их районах оно может быть очень существенным.

Гораздо более заметно влияние урбанизации на качество вод. Если ориентироваться на третий, осредненный, вариант водопотребления и сложить объем сточных вод и величину стока с урбанизированных площадей, то их годовая сумма в мире составит 1935, в Зарубежной Азии – 752, Северной Америке – 537, Зарубежной Европе – 323, Южной Америке – 154, Африке – 98, России – 60, Австралии и Океании – 19 км³, что значительно превышает объем годового изменения стока в результате урбанизации и, главное, резко ухудшает качество воды рек и водоемов, поскольку как сточные воды, так и сток с урбанизированных площадей в значительной мере загрязнены, оказывают негативное влияние на водные экосистемы, несмотря на частичную их очистку. Более очевидно, что загрязнены сточные воды от точечных источников, но и сток с урбанизированных площадей также существенно загрязнен и, как правило, в меньшей степени очищается. О загрязнении вод, стекающих с этих площадей, можно судить, например, по работам (Барымова, Чернышев, 1982; Гордин, Кирпичникова, 1992; Диффузное ..., 2020; Черногаева и др., 2019).

В первом приближении о степени загрязнения природных вод сточными водами и стоком с урбанизированных территорий можно судить по

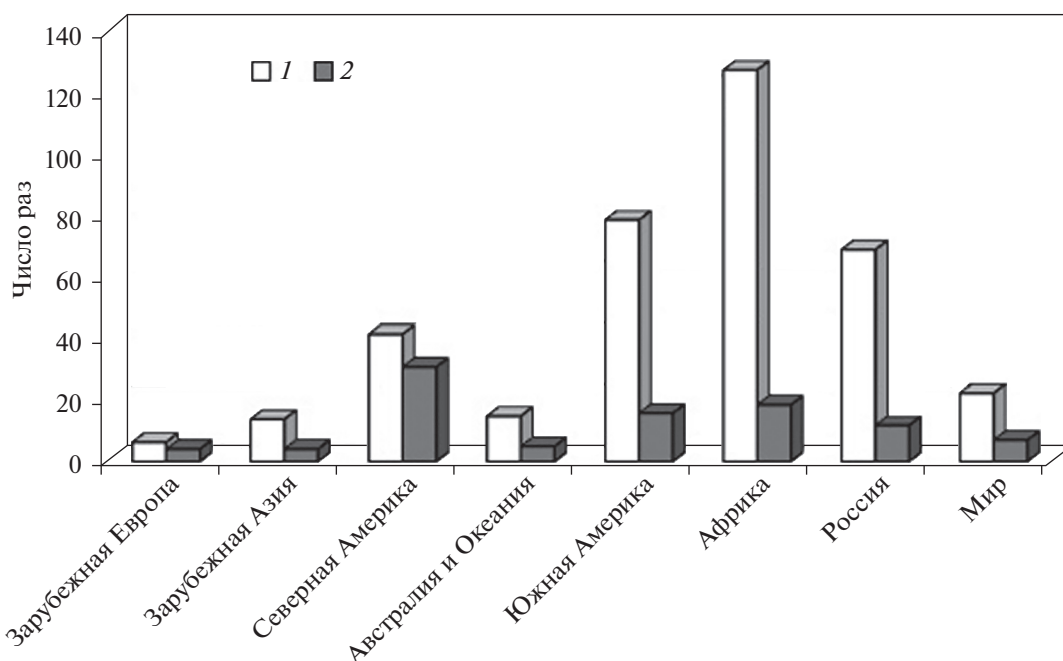


Рис. 1. Кратность разбавления суммарного объема сточных вод и стока с урбанизированных площадей ресурсами среднего годового речного стока с общей территории (1) и с наиболее обжитой части (2).

кратности разбавления их суммарного объема ресурсами речного стока (рис. 1). Наиболее неблагоприятная ситуация по этому показателю складывается в Зарубежной Европе — кратность разбавления общим стоком составляет 6 раз, а стоком с наиболее обжитой части — лишь 4 раза. Иными словами, в последнем случае четверть стока с наиболее обжитой территории Зарубежной Европы представляет собой в той или иной степени загрязненные воды. Немногом лучше положение в Зарубежной Азии и Северной Америке, да и в мире в целом (разбавление общим стоком — 22 раза, а стоком с наиболее обжитой части — 7 раз). Относительно более благополучное положение в Южной Америке, Африке, Австралии и Океании, России за счет главным образом больших ресурсов речного стока. Аналогичный расчет кратности разбавления с использованием данных по сточным водам в других вариантах мало меняет представленную ситуацию. Конечно, представлена весьма общая картина, в отдельных же районах и речных бассейнах она может существенно отличаться от этих общих оценок как за счет размеров урбанизированных площадей и водопотребления, так и за счет имеющихся ресурсов речного стока и степени очистки загрязненных вод.

Выполненные в данной статье разработки дают ориентировочное представление о влиянии урбанизации на речной сток и качество вод. Оно может быть существенно скорректировано за счет более детальных исследований влияния на сток

урбанизированных ландшафтов в различных природных и хозяйственных условиях, более точного определения площади урбанизированных и наиболее обжитых территорий и стока с них, а также объема водопотребления, степени загрязнения сточных вод и т.д. Но, как нам представляется, порядок приведенных величин влияния урбанизации на сток и качество вод при этом не должен кардинально измениться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из двух аспектов влияния урбанизации на годовой сток — его увеличения за счет роста урбанизированных площадей и уменьшения в результате водопотребления, первый преобладает, что обуславливает общее увеличение стока, особенно в наиболее обжитой части рассматриваемых регионов. Так, увеличение мирового годового стока в результате роста площади урбанизированных ландшафтов составляет на современном этапе более $760 \text{ км}^3/\text{год}$ при безвозвратном расходе по трем рассматриваемым вариантам на уровне 2017 г. от 167 до $210 \text{ км}^3/\text{год}$. То есть, общее увеличение стока в результате урбанизации превышает $550 \text{ км}^3/\text{год}$, что в два с лишним раза больше среднего годового стока Волги. Хотя по отношению к общему годовому стоку это составляет лишь 1.3—1.4%, а к стоку с наиболее обжитой территории немногим более 4%. Наибольший объем увеличения стока имеет место в Зарубежной Азии и Северной Америке (от 165 до $191 \text{ км}^3/\text{год}$), а относи-

тельно общего стока — в Зарубежной Европе (4.4–6.4%) и Северной Америке (2.3–2.4%), относительно же стока с наиболее обжитой территории — 6.9–7.3 и 7.0–7.1% соответственно. Для остальных континентов и России характерно значительно меньшее влияние урбанизации на сток. Вместе с тем, в отдельных частях рассматриваемых регионов это влияние в процентном отношении может быть значительно выше.

Намного более ощутимо влияние урбанизации на качество вод рек и водоемов. Если судить о нем по кратности разбавления речным стоком суммарного объема сточных вод и стока с урбанизированных площадей, как правило, загрязненного, то выявляется весьма неблагоприятная картина. Кратность разбавления общим стоком в Западной Европе по осредненному варианту расчетов составляет всего 6 раз, а стоком с наиболее обжитой ее части — 4 раза. Немногим лучше положение в Зарубежной Азии и Северной Америке, как и в мире в целом (разбавление стоком с наиболее обжитой его части всего 7 раз). Несколько лучше ситуация на других континентах и в России. Но ее тоже нельзя считать благополучной, особенно в местах наибольшего сосредоточения населения и промышленности.

Выполненные расчеты носят ориентировочный характер, нуждаются в уточнении по мере поступления новой информации, но в целом свидетельствуют о том, что в гидрологических и гидроэкологических расчетах следует считаться с гидрологической ролью урбанизации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007).

FUNDING

The article was carried out within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. АААА-А19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас мирового водного баланса Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 638 с.
- Барымова Н.А., Чернышев Е.П. Состав поверхностного стока с городской территории и качество речных вод // Взаимодействие хозяйства и природы в городских и промышленных геосистемах. М., 1982. С. 31–45.
- Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2018 году: Стат. сб. / под ред. Н.Г. Рыбальского, В.А. Омеляненко. М.: НИИ-Природа, 2019. 274 с.

- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Гос. гидрол. ин-т, 2008. 600 с.
- Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 548 с.
- Голиков А.П., Казакова Н.А. География мирового водопотребления: состояние. Динамика, перспективы // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Міжнародні відносини. Економіка. Країнознавство. Туризм. 2018. Вип. 8. С. 17–25. doi: 24.26565/2310-9513-2018-8-02
- Гордін І.В., Кирпичникова Н.В. Динамика загрязнения Верхней Волги талым стоком городских территорий // Водные ресурсы. 1990. № 2. С. 37–42.
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
- Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 377 с.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на мировой речной сток // Изв. РГО. 2020. Т. 152. № 5. С. 58–67. <https://doi.org/10.31857/S086960712005002X>
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Антропогенные воздействия на сток реки Москвы. М.: Макс Пресс, 2015. 168 с.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Влияние урбанизированных ландшафтов на речной сток в Европе // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 3. С. 78–87. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019378-87>
- Курпиров В.В. Гидрологические аспекты урбанизации Л.: Гидрометеиздат, 1977. 184 с.
- Курбатова А.С. Ландшафтно-экологические основы формирования градостроительных структур Москвы. М.—Смоленск: Маджента, 2004. 400 с.
- Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
- Львович М.И. Вода и жизнь. М.: Мысль, 1986. 256 с.
- Львович М.И., Черногаева Г.М. Изменение водного баланса территории под влиянием урбанизации // Проблемы гидрологии. М.: АН СССР, 1978. С. 43–52.
- Львович М.И., Чернышёв Е.П. Закономерности водного баланса и вещественного обмена в условиях города // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1983. № 3. С. 23–29.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. М.: Гидрометеиздат, 1974. 638 с.
- Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
- Устюжанин Б.С. Реакция речного стока на урбанизацию водосбора // Расчеты и прогнозы гидрологических характеристик: Сб. науч. тр. Вып. 103. Л.: ЛГМИ, 1989. С. 73–81.
- Черногаева, Г.М., Жадановская Е.А., Журавлева Л.Р., Малееванова Ю.А. Загрязнение окружающей среды в районах России в начале XXI века. М.: ООО “Полиграф-Плюс”, 2019. 232 с.
- Шикломанов И.А. Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 153 с.

- Andressian V.P. Forecasting water requirements for the beginning of the 21st century: A World-Scale Study. Paris: UNESCO, 1994. 26 p.
- Angel Sh., Parent J., Civco D.L., Blei A.M. Atlas of Urban Expansion. Massachusetts: Cambridge, 2012. 397 p.
- Choe J.S., Bang K.W., Lee J.H. Characterization of surface runoff in urban areas // Wat. Sci. Technol. 2002. № 45 (9). P. 249–254.
- Espey W.H., Jr. Morgan C.W., Masch F.D. Study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed. Report № 23 for Texas water development board. The Univ. of Texas. 1966. 110 p.
- Falkenmark M., Lindth G. How can we cope with the water resources situation by the year 2015? // AMBIO. 1974. № 3 (3–4). P. 114–121.
- Li C., Liu M., Hu Y., Shi T., Zong M., Walter M.T. Assessing the Impact of Urbanization on Direct Runoff Using Improved Composite CN Method in a Large Urban Area // Int. J. of Environ. Res. and Publ. Health. 2018. № 5 (4). P. 775–783.
- Margat J. Water use in the world: present and future. Contribution au Project M-1–3 du Programme Hydrologique International. Paris: PHI-IV/UNESCO, 1994. 88 p.
- Rodda J.C. Guessing or assessment of the world's water resources? // Water Environ. J. 1995. № 9. P. 360–368.
- United Nations, The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. Paris: UNESCO, 2021. 206 p.
- World Water Resources at the Beginning of the 21st Century / A. Shiklomanov, J. Rodda (Eds.). UNESCO, Cambridge Univ. Press, 2003. 436 p.
- WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme). 2019. The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. Paris: UNESCO, 2019. 201 p.

Urbanization Impact on Annual Runoff and Water Quality in the World and on Continents

N. I. Koronkevich¹, *, E. A. Barabanova¹, I. S. Zaitseva¹, and K. S. Mel'nik¹

¹ Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

*e-mail: koronkevich@igras.ru

The growing urbanization impact on the average annual river runoff of Russia, continents (world parts), and the world, as well as on water quality is considered. The impact of two urbanization aspects is assessed. One of them is the influence of urbanized landscapes, a significant part of which are settlements and roads. On the area they occupy, more often being polluted, there is a sharp decrease in water permeability and an increase in the surface and total runoff. Another aspect is municipal and industrial water consumption associated with water withdrawals, partly irrecoverable, and with the discharge of polluted wastewater into rivers and water bodies. It is shown that for the most of considered regions and the world, both the current increase in runoff from urbanized landscapes and its decrease because of water consumption are tens and even hundreds of cubic kilometers per year, although both of the effects are relatively small in relation to the available water resources. In the most inhabited part of the territory, the total urbanization impact on runoff is more pronounced, and, as a rule, a general increase in runoff prevails. Urbanization has a much greater impact on water quality since the dilution of wastewater and polluted water coming from urbanized areas is clearly insufficient.

Keywords: urbanization, urbanized territories, landscapes, complete and irrevocable water consumption, change in annual runoff, wastewater, dilution factor of polluted waters, world, continents, Russia

REFERENCES

- Andressian V.P. *Forecasting Water Requirements for the Beginning of the 21st Century: A World-Scale Study*. Paris: UNESCO, 1994. 26 p.
- Angel S., Parent J., Civco D.L., Blei A.M. *Atlas of Urban Expansion*. Cambridge, MA, 2012. 397 p.
- Atlas mirovogo vodnogo balansa Zemli* [Atlas of the World Water Balance of the Earth]. Leningrad: Gidrometizdat Publ., 1974. 638 p.
- Barymova N.A., Chernyshev E.P. The composition of surface runoff from the urban area and the quality of river waters. In *Vzaimodeistvie khozyaistva i prirody v gorodskikh i promyshlennyykh geosistemakh* [Interaction of Economy and Nature in Urban and Industrial Geosystems]. Moscow, 1982, pp. 31–45. (In Russ.).
- Chernogaeva G.M., Zhadanovskaya E.A., Zhuravleva L.Rh., Malevanova Yu.A. *Zagryaznenie okruzhayushchei sredy v raionakh Rossii v nachale XXI veka* [Environmental Pollution in the Regions of Russia at the Beginning of the 21st Century]. Moscow, 2019. 232 p.
- Choe J.S., Bang K.W., Lee J.H. Characterization of surface runoff in urban areas. *Water Sci. Technol.*, 2002, vol. 45, no. 9, pp. 249–254.
- Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov-Danil'yan V.I., Ed. Moscow, 2020. 512 p.
- Espey W.H., Jr., Morgan C.W., Masch F.D. *Study of Some Effects of Urbanization on Storm Runoff from a Small Watershed*. Report no. 23 for Texas Water Development Board. Univ. of Texas, 1966. 110 p.

- Falkenmark M., Lindth G. How can we cope with the water resources situation by the year 2015? *AMBIO*, 1974, no. 3 (3–4), pp. 114–121.
- Golikov A.P., Kazakova N.A. Geography of world water consumption: state of the art. Dynamics, prospects. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser.: Int. Relations. Economy. Country Stud. Tourism*, 2018, vol. 8, pp. 17–25. (In Russ.).
<https://doi.org/24.26565/2310-9513-2018-8-02>
- Gordin I.V., Kirpichnikova N.V. Dynamics of pollution of the Upper Volga River by thawed runoff of urban areas. *Vodn. Resur.*, 1990, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.).
- Kalinin G.P. *Problemy global'noi gidrologii* [Problems of Global Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1968. 377 p.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Mel'nik K.S. Influence of urbanized territories on the global river runoff. *Izv. Russ. Geogr. O-va*, 2020, vol. 152, no. 5, pp. 58–67. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S086960712005002X>
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. *Antropogennyye vozdeistviya na stok reki Moskvy* [Anthropogenic Impact on the Moscow River Runoff]. Moscow: Maks Press, 2015. 168 p.
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. Influence of urbanized landscapes on river runoff in Europe. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 78–87. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019378-87>
- Kupriyanov V.V. *Gidrologicheskie aspekty urbanizatsii* [Hydrological Aspects of Urbanization]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 184 p.
- Kurbatova A.S. *Landshaftno-ekologicheskie osnovy formirovaniya gradostroitel'nykh struktur Moskvy* [Landscape and Ecological Foundations of the Formation of Urban Planning Structures in Moscow]. Moscow, Smolensk: Madzhenta Publ., 2004. 400 p.
- L'vovich M.I. *Mirovye vodnye resursy i ikh budushchee* [World Water Resources and Their Future]. Moscow: Mysl' Publ., 1974. 448 p.
- L'vovich M.I. *Voda i zhizn'* [Water and Life]. Moscow: Mysl' Publ., 1986. 256 p.
- L'vovich M.I., Chernogaeva G.M. Changes in water balance of a territory under the effect of urbanization. In *Problemy gidrologii* [Problems of Hydrology]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1978, pp. 43–52. (In Russ.).
- L'vovich M.I., Chernyshev E.P. Regularities in water balance and matter exchange under urban conditions. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.*, 1983, no. 3, pp. 23–29. (In Russ.).
- Li C., Liu M., Hu Y., Shi T., Zong M., Walter M.T. Assessing the impact of urbanization on direct runoff using improved composite CN method in a large urban area. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 775–783.
- Margat J. *Water Use in the World: Present and Future. Contribution au Project M-1–3 du Programme Hydrologique International*. Paris: PHI-IV/UNESCO, 1994. 88 p.
- Mirovoi vodnyi balans i vodnye resursy Zemli* [World Water Balance and Water Resources of the Earth]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 638 p.
- Reimers N.F. *Prirodopol'zovanie. Slovar'-spravochnik* [Natural Resource Use. Reference Dictionary]. Moscow: Mysl' Publ., 1990. 637 p.
- Rodda J.C. Guessing or assessment of the world's water resources? *Water Environ. J.*, 1995, vol. 9, no. 4, pp. 360–368.
- Shiklomanov I.A. *Issledovanie vodnykh resursov sush'i: itogi, problemy, perspektivy* [Investigation of Land Water Resources: Results, Problems, Prospects]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1988. 153 p.
- United Nations. *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*. Paris: UNESCO, 2021. 206 p.
- Ustyuzhanin B.S. Reaction of river runoff to the urbanization of the catchment area. In *Raschety i prognozy gidrologicheskikh kharakteristik* [Calculations and Forecasts of Hydrological Characteristics]. Leningrad: LGMI, 1989, vol. 103, pp. 73–81. (In Russ.).
- Vodnye resursy i vodnoe khozyaistvo Rossii v 2018 godu (Statisticheskii sbornik)* [Water Resources and Water Management of Russia in 2018 (Statistical Book)]. Rybal'skii N.G., Omel'yanenko V.A., Eds. Moscow: NIA-Priroda, 2019. 274 p.
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Gidrol. Inst., 2008. 600 p.
- Voskresenskii K.P. *Norma i izmenchivost' godovogo stoka rek Sovetskogo Soyuz* [Normal Annual Runoff and Runoff Variability of the Soviet Union Rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962. 548 p.
- World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. Shiklomanov A., Rodda J., Eds. UNESCO, Cambridge Univ. Press, 2003. 436 p.
- WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme). *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. Paris: UNESCO, 2019. 201 p.