
ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 911.375; 504.54(1-21)

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМАТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ
ГОРОДСКИХ ГЕОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛЬНЫХ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ**
Э.П. Романова¹, М.А. Аршинова²
^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра физической географии мира и геоэкологии*
¹ *Профессор, докт. геогр. н., e-mail: romanova@kmail.ru*
² *Ст. науч. с., e-mail: amari_geo@mail.ru*

Рассматриваются подходы к систематике и классификации городских ландшафтов, которые являются наиболее значимыми трансформаторами природных геосистем. Обосновано выделение двух групп энергетических и материальных потоков на городских территориях – трансформированных и автономных. К первым отнесены, например, водопотребление, потребление конечной энергии и др. Автономные потоки, не существовавшие в исходных ландшафтах, – это, например, концентрация массы твердых отходов или выброс в атмосферу парниковых газов. Из 819 европейских городов с населением свыше 100 тыс. человек выбраны ключевые города для четырех категорий численности, принятых в статистической системе ООН (свыше 5 млн чел.; от 1 до 5 млн чел.; от 500 тыс. до 1 млн чел.; от 100 тыс. до 500 тыс. чел.). Выявлены особенности материальных и энергетических потоков в городах зарубежной Европы и европейской части России с разной численностью населения. Города первой категории характеризуются максимальными удельными показателями всех материальных и энергетических потоков, как природно-антропогенных, так и автономных. В городах, относящихся ко второй категории, существенно уменьшается энергетическая нагрузка на территорию. Для городов, входящих в третью категорию, наиболее острыми геоэкологическими проблемами являются обеспечение продовольствием, снабжение питьевой водой, удаление бытовых отходов, а в городах четвертой категории на первое место выходят проблемы очистки воды и воздуха. Параметры трансформации материальных и энергетических потоков на городских территориях и расчетные показатели их воздействия на окружающую среду позволяют установить классификационные признаки для разработки системы мелкомасштабной классификации городских геосистем.

Ключевые слова: современные ландшафты, городские геосистемы, энергетические потоки, материальные потоки, геоэкологические проблемы, европейский регион

ВВЕДЕНИЕ

Городские геосистемы представляют очаги наиболее сильного трансформирующего воздействия на природную среду. По данным Департамента ООН по народонаселению [World..., 2019], уже свыше половины современных жителей планеты (4345 млн человек, или 55,7%) живут в городах. Города занимают незначительную часть суши. Согласно статистической базе ФАО [FAOSTAT, 2018], в мире они сосредоточены на площади 363 млн га, или 2,4% общего земельного фонда суши Земли. Однако, несмотря на скромные территориальные размеры, городские образования – это очень сложные объекты в структурном, функциональном, социальном и экономическом отношении.

В отличие от вмещающих природных ландшафтов в городах складывается особый тип антропогенных и природно-антропогенных процессов [Курбатова, 2004; Романова и др., 2019; Яницкий, 2013;

Decker, 2000; Deilmann, 2009; Xuemei Bai, 2016]. Это касается трансформации энергетических и материальных потоков, возникновения и развития ряда автономных потоков, например аккумуляции продовольственного сырья и продуктов питания или формирования массы разнообразных отходов [Pincetl et al., 2012; Shahrokni et al., 2015]. Специфика городских комплексов обусловлена уничтожением естественной растительности и почв и появлением зон жилой, промышленной или административной застройки и транспортных объектов. Подобные общие свойства различно проявляются в городских геосистемах в зависимости от градобразующих функций, исторических, социальных, экономических и культурных факторов формирования и функционирования города [Castan et al., 2012; Conke et al., 2015; Zhang, 2013].

Большую роль при этом играет размер города. Небольшие поселения с числом жителей до

100 тыс. человек, как правило, однородны и выполняют две-три функции (портовые, транспортные, туристические и т. д.). В крупных городах, особенно столичных, функций множество, они создают особые отчетливые зоны с индивидуальной структурой (застройкой) и материально-энергетическими потоками [Ермолаева, 2015; Kennedy et al., 2014].

По происхождению и силе техногенного воздействия природно-антропогенные процессы в городах подразделяются на две генетические группы (рис. 1).

Первая группа – это в разной степени трансформированные природно-антропогенные процессы, существовавшие в коренных ландшафтах и ныне существующие в измененном виде. Таковы, например, климатогенные процессы – осадки, сток, ветровая или солнечная энергия. Хозяйственные объекты существенно меняют качество и количество природных ресурсов или сырья, однако формирование последних изначально происходило и продолжает происходить в современных ландшафтах, обеспечивая экосистемные услуги, которые исторически используются человеком.



Рис. 1. Основные автономные и трансформирующие потоки вещества и энергии в городских геосистемах

Fig. 1. The main autonomous and transforming flows of matter and energy in urban geosystems

Вторая группа – автономные процессы. Она характеризует материальные или энергетические потоки, никогда не существовавшие в девственной природе. Это концентрация на ограниченном пространстве города массы продуктов питания и твердых отходов или выброс в атмосферу парниковых газов и т. д. Показатели таких потоков по объему определяются численностью жителей, площадью города и основными функциями городской геосистемы.

Анализ подобных процессов проведен для городов зарубежной Европы и европейской территории Российской Федерации как макрорегиона, природные ландшафты которого в наибольшей степени изменены трансформирующим воздействием городов. Показатели и индикаторы, описывающие подобные процессы, могут рассматриваться в ка-

честве классификационных при систематике современных ландшафтов и построении легенд мелкомасштабных карт [Романова и др., 2019; Kennedy et al., 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка систематики техногенных городских ландшафтов для выявления их воздействия на природную среду проводилась по упомянутому выше макрорегиону. Общее число городов с населением свыше 100 тыс. человек на этой территории равно 819. Они размещаются в ландшафтах двух географических поясов, четырех секторов и 12 природных зон [Романова и др., 2014]. По численности жителей и занимаемой площади города делятся на восемь групп (по две в каждой статистической катего-

рии ООН – для зарубежной Европы и европейской части России, соответственно). В первую и пятую группы входят города-метрополии с населением свыше 5 млн человек; их всего четыре (Лондон, Париж, Санкт-Петербург и Москва). Во вторую и шестую группы – с населением от 1 до 5 млн человек – 27 городов в зарубежной Европе и восемь в европейской части России; в третью и седьмую группы – от 1 млн до 500 тыс. человек – 57 и 15 городов, в четвертую и восьмую группы, с населением от 500 до 100 тыс. человек – 605 и 103 города соответственно (рис. 2).

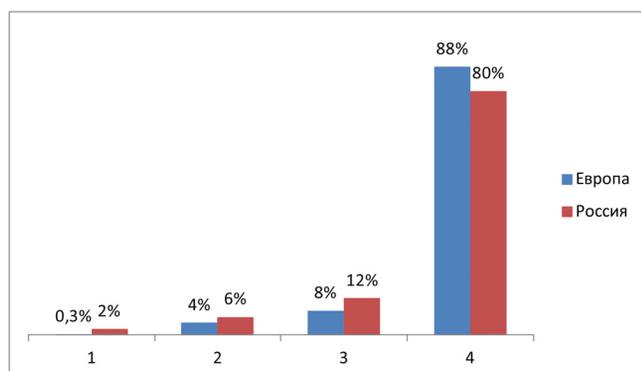


Рис. 2. Распределение городов по категориям численности: 1 – свыше 5 млн чел.; 2 – от 1 до 5 млн чел.; 3 – от 500 тыс. до 1 млн чел.; 4 – от 100 тыс. до 500 тыс. чел. Составлено по данным [Eurostat, 2020]

Fig. 2. Distribution of cities by population categories: 1 – over 5 million people; 2 – from 1 to 5 million people; 3 – from 500 thousand to 1 million people; 4 – from 100 thousand to 500 thousand people. Compiled from [Eurostat, 2020]

Определенная часть горожан проживает в небольших городских поселениях (меньше 100 тыс. жителей), на которые приходится значительная доля площади в категории селитебных геосистем. Однако по силе антропогенного воздействия они несравнимы с большими городами.

Обработка информационных баз городских геосистем проводилась на основе учета определенных показателей и индикаторов. Базовыми среди них являются количество жителей и площадь города, а также наиболее значимые геоэкологические характеристики – энергопотребление; потребление продовольствия; водопотребление; масса твердых отходов (ТКО); выбросы парниковых газов. Отбор необходимых показателей проводился с использованием европейских, российских и международных статистических справочников, обзоров и законченных проектов, представляющих собой наиболее авторитетные источники информации [Eurostat..., 2019; FAOSTAT, 2018; World..., 2019; Emission..., 2020].

Основные расчеты проводились по ключевым городским геосистемам, наиболее типичным для выделенной группы городов. В пределах каждой группы рассчитывались медианные значения численности жителей, а затем из перечня городов данной группы выбирался тот, который наиболее близко соответствовал расчетным показателям. Такой город и рассматривался в качестве ключевого (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ключевых городов проводился по пяти энергетическим и материальным потокам (см. выше).

Энергетический поток. В коренных ландшафтах, вмещающих города, в соответствии с их зональным расположением величины радиационного баланса колеблются от 45 ккал/см² в год (для гумидного сектора умеренного пояса) до 50 ккал/см² в год (для семигумидных ландшафтов субтропиков).

Объем потребляемой конечной энергии в странах зависит от размеров территории государства и уровня развития его экономики. Эти особенности отражаются в национальных структурах энергобаланса, в том, какую роль играют различные энергисточники и на какие отрасли городского хозяйства расходуется энергия [Государственный доклад..., 2018; Energy use, 2020]. Но для решения поставленной задачи – оценки города как фактора трансформации коренного ландшафта – первостепенное значение имеет антропогенная энергетическая нагрузка на единицу площади (табл. 2).

Расчеты свидетельствуют о том, что ежегодное душевое потребление конечной энергии колеблется в городах в пределах от 2500 до 3800 тыс. тонн н. э. Это общая особенность макрорегионов с развитой экономикой и высоким уровнем благополучия населения. Трансформирующее влияние городов на общий энергопоток сказывается в том, насколько объем конечной энергии сравним с величиной потока солнечной энергии, приходящей во вмещающий коренной ландшафт. Как показывают расчеты (см. табл. 2), нагрузка антропогенного потока почти во всех группах городов зарубежной Европы составляет 19–23% от природного. В городах РФ эти показатели повышаются до 24–36%. Исключение образуют города мультимиллионеры – Москва и Лондон, выполняющие к тому же столичные функции. В них отмечается самая большая энергетическая нагрузка на городские геосистемы (49 и 40% от природно-обусловленной).

Потребление продовольственной энергии. Концентрация больших объемов продовольствия – одна из основных обеспечивающих услуг современных городских геосистем [Романова и др., 2019]. Европейские города возглавляют мировые

рейтинги по калорийности суточного питания, намного превосходящей норму потребления пищи, рекомендуемую ВОЗ (3000 ккал/сутки) [FAOSTAT, 2018]. Поэтому во всех городах зарубежной Европы, независимо от группы, происходит значительная аккумуляция энергоемких продовольственных товаров (табл. 3). На 1 км² городской площади еже-

годно требуется обеспечить горожан продуктами питания от 2 до 7 млрд ккал. Продовольственный поток энергии возможен только при условии техногенного обеспечения жителей пищей. Естественная продуктивность ландшафта не создает услуги, обеспечивающие горожан питанием, и поэтому этот вид энергопотока полностью автономен.

Таблица 1

Ключевые города (по категориям численности населения)

Группы городов и ключевой город	Население, чел.	Площадь, км ²
<i>В зарубежной Европе</i>		
Более 5 млн чел		
Лондон	8 908 081	1 572
От 1 до 5 млн чел	Среднее значение 1 714 751 чел.	
Варшава	1 735 442	518
От 500 тыс. до 1 млн чел	Среднее значение 677 760 чел.	
Палермо	668 405	158
От 100 до 500 тыс. чел	Среднее значение 200 706 чел.	
Кассель	200 736	107
<i>В европейской части России</i>		
Более 5 млн чел		
Москва	12 692 466	2 561
От 1 до 5 млн чел	Среднее значение 1 132 000 чел.	
Ростов-на-Дону	1 137 904	356
От 500 тыс. до 1 млн чел	Среднее значение 612 500 чел.	
Ярославль	608 353	205
От 100 до 500 тыс. чел	Среднее значение 209 400 чел.	
Псков	210 340	95,6

Составлено по [Europe..., 2020; The Largest..., 2018].

Таблица 2

Энергетические потоки в городах

Город	Природная энергетика		Антропогенная энергетическая составляющая			Доля антропогенной энергетической нагрузки от природной, %
	Суммарная солнечная радиация, ккал/см ² в год	Радиационный баланс, ккал/см ² в год	Удельное потребление энергии, кг н. э. на 1 чел./год	Общее потребление в городе, 10 ⁴ ккал/год	Энергетическая нагрузка, ккал/см ² в год	
Лондон	95	45	3 183	2 835 442 1820	18,03	40
Варшава	100	36	2 490	4 321 250 580	8,34	23
Палермо	160	50	2 482	1 658 981 210	10,50	21
Кассель	100	37	3 818	766 410 048	7,16	19
Москва	90	35	3 460	43 915 932 360	17,1	49
Ростов-на-Дону	110	42	3 168	3 604 879 872	10,13	24
Ярославль	85	28	3 351	2 038 590 903	9,94	36
Псков	85	28	3 833	806 233 220	8,43	30

Составлено по [Государственный доклад..., 2018; Energy use, 2020].

Таблица 3

Потребление продовольственной энергии в городах

Город	Биопродуктивность вмещающего ландшафта, т/га в год	Энергия в органическом веществе, кДж/г сухого вещества	Удельная калорийность органического вещества, млн ккал в год на 1 км ²	Калорийность питания, ккал/чел. в сутки	Потребление продовольственной энергии, млн ккал в год	Удельное потребление продовольственной энергии, млн ккал в год на 1 км ²	Доля антропогенной продовольственной нагрузки от природной калорийности, %
Лондон	13	17	5 278	3 371	10 960 636	6 972	132
Варшава	10	18	4 300	3 366	2 132 147	4 116	96
Палермо	7	15	2 500	3 765	918 539	5 813	232
Кассель	11	17	4 500	3 848	281 938	2 635	58
Москва	11	18	4 730	2 261	10 474 648	4 090	86
Ростов-на-Дону	11	16	4 200	2 774	1 152 139	3 236	77
Ярославль	10	19	4 500	2 822	626 622	3 057	68
Псков	9	20	4 300	2 290	175 813	1 839	43

Составлено по [Состав..., 2020; FAOSTAT, 2018].

Трансформация гидрологического потока в городах. Удельное потребление воды в европейских городах колеблется от 130 до 180 л на 1 человек в сутки [Eurostat..., 2019]. Из российских городов этому показателю соответствует только Москва, в остальных удельное водопотребление намного выше [Вода России, 2020], что связано с менее эффективной работой систем водоснабжения и значительными потерями в водопроводных сетях. Общее водопотребление закономерно снижается по мере уменьшения численности городского населения.

Водохозяйственная нагрузка на территорию с учетом площади городов варьирует в широких пределах – от 150 до 340 тыс. м³ на 1 км² в год (табл. 4), при этом наиболее высокие значения характерны для сверхкрупных городов (Лондон и Москва). Исключением является немецкий город Кассель, относящийся к группе средних городов зарубежной Европы, в котором техногенный поток воды на городской территории не превышает 90 тыс. м³ на 1 км² в год.

Анализ техногенных потоков воды в различных по численности группах городов Европы показывает практически повсеместное их превышение над природными (от 1,5 до почти двукратного). Водохозяйственная нагрузка на территорию средних городов, расположенных в семигумидных секторах (Кассель и Псков), сопоставима с величиной слоя стока, составляя 74 и 91% его значений соответственно.

Наиболее трансформированы природные водные потоки в российском городе-миллионере Ростове-на-Дону, расположенном в субаридных степных ландшафтах. Здесь водохозяйственная на-

грузка на территорию почти в пять раз больше слоя стока. В условиях крайне низкой природной водообеспеченности (всего 30 тыс. м³ на 1 км² городской территории в год) водоснабжение населения осуществляется преимущественно за счет транзитного стока Дона, из которого на коммунально-бытовые нужды город забирает более 166 млн м³ воды в год.

Выбросы парниковых газов. В атмосферу Европы ежегодно поступают миллионы тонн газообразных соединений, опасных для здоровья людей и окружающей среды. В пересчете на CO₂-экв. общий объем выбросов газообразных загрязнителей равен 3,5 млрд т в год (10% от планетарных объемов) [Emission..., 2020].

Объемы выбросов зависят главным образом от энергетических установок и плотности автотранспорта. В городах зарубежной Европы наблюдается достаточно сходная ситуация и с энергоснабжением, и с использованием транспортных средств, удельная нагрузка выбросов на каждый квадратный километр колеблется незначительно – от 20 до 37 тыс. т CO₂-экв. в год (табл. 5). В российских городах нагрузка увеличивается до 34–49 тыс. т CO₂-экв. в соответствии с ростом производства и потребления энергии. Крупнейшие столичные метрополии – Москва и Лондон – характеризуются очень высокими показателями нагрузок – 76 и 42 тыс. т CO₂-экв. на 1 км² в год соответственно, что объясняется их демографической и экономической полифункциональностью.

Накопление и ликвидация твердых коммунальных отходов. По происхождению процесс накопления отходов автономен, но его влияние на окружающую

щие ландшафты очень велико. В зарубежной Европе ежегодно формируется около 200 млн т бытового мусора – примерно 500 кг на одного жителя [Waste prevention..., 2015]. По физическому и химическому составу эта огромная масса весьма разнородна – это и органические отходы, и стекло, бумага, текстиль, старая аппаратура и мебель и т. д. Каждая структурная часть отходов требует особой системы сбора, удаления и ликвидации. В странах ЕС преобладающая

часть отходов или сжигается, т. е. используется как дополнительный энергоисточник, или перерабатывается в качестве вторсырья [Никуличев, 2017; Pires, 2011]. Резко сокращается складирование отходов в почву, и поэтому нагрузка на ландшафты постоянно уменьшается (табл. 6). В крупных российских городах показатели нагрузки отходов на ландшафт значительно выше, основная масса образующихся отходов складировается [Кондратенко, 2017].

Таблица 4

Природные и антропогенные водные потоки в городах

Город	Природная составляющая		Антропогенная составляющая			Соотношение антропогенной нагрузки и стока, %
	Осадки, мм в год	Сток, тыс. м ³ /км ²	Удельное водопотребление, л/чел. в сутки	Общее водопотребление в городе, млн м ³ в год	Водохозяйственная нагрузка, тыс. м ³ /км ² в год	
Лондон	753	180	164	533	339	188
Варшава	519	120	168	106	205	171
Палермо	611	200	180	44	278	139
Кассель	699	120	130	9,5	89	74
Москва	688	180	168	778	304	169
Ростов-на-Дону	579	30	123	51	144	478
Ярославль	544	200	288	64	312	156
Псков	622	250	285	22	229	91

Составлено по [Fresh water abstraction..., 2020; Вода России, 2020].

Таблица 5

Выбросы парниковых газов в городах

Город	Удельные выбросы парниковых газов, т CO ₂ -экв. на 1 чел. в год (национальный показатель)	Общий выброс парниковых газов в городе, млн т CO ₂ -экв. в год	Нагрузка парниковых газов, тыс. т CO ₂ -экв./км ² в год
Лондон	7,5	66,8	42,5
Варшава	11,0	19,1	36,9
Палермо	7,3	4,9	30,9
Кассель	10,7	2,1	20,1
Москва	15,31	194,3	75,9
Ростов-на-Дону	15,31	17,4	48,9
Ярославль	15,31	9,3	45,4
Псков	15,31	3,2	33,7

Составлено по [EU greenhouse..., 2018].

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты и полученные индикаторы позволяют выявить ряд закономерностей геоэкологического характера.

1. Города европейского макрорегиона (включая зарубежную и российскую часть Европы) размещаются на территории двух географических поясов,

пяти секторов и 12 природных зон. По численности населения и занимаемой площади города делятся на следующие восемь групп.

Группы 1 и 5 (города-метрополии с населением свыше 5 млн жителей) характеризуются максимальными удельными показателями всех материальных, энергетических, природно-антропогенных

Таблица 6

Образование твердых коммунальных отходов в городах

	Удельное образование ТКО, кг/чел в год	Общее количество ТКО в городе, тыс. т в год	Нагрузка ТКО, т/км ² в год
Лондон	482	4286	2726
Варшава	272	474	915
Палермо	488	327	2068
Кассель	615	123	1154
Москва	642	8148	3182
Ростов-на-Дону	476	542	1521
Ярославль	281	171	834
Псков	285	60	627

Составлено по [Municipal..., 2016; Кондратенко, 2017].

и автономных потоков. Наблюдаются практически все геоэкологические проблемы, но их острота варьирует по внутригородским зонам. Очень высокий объем потребления конечной энергии и выбросов парниковых газов характерен для промышленных зон, а дефицит продовольствия и продуктов питания – для жилой застройки. Поскольку в границах городской геосистемы отсутствуют возможности местного самообеспечения продовольствием, проблема решается за счет колоссального импорта энергоносителей и продовольственного сырья. Остро ощущается дефицит чистой питьевой воды.

Группы 2 и 6 (города с численностью жителей от 5 до 1 млн чел.). Удельные классификационные индикаторы количественно снижаются, но остаются высокими. По сравнению с крупнейшими городами наиболее существенно уменьшается энергетическая нагрузка на территорию. В целом набор геоэкологических проблем схож с проблемами городов высших групп.

Группы 3 и 7 (города с численностью жителей от 500 тыс. до 1 млн жителей). Самые острые геоэкологические проблемы – импорт продовольствия, обеспечение питьевой водой, удаление и обезвреживание ТБО. Большая часть городов данных групп подключена к общенациональным системам электроснабжения, и поэтому реально существующий в городе дефицит энергии не ощущается.

Группы 4 и 8 (города с численностью от 100 до 500 тыс. жителей). Удельные показатели резко снижены, и объемы потоков также заметно сокраща-

ются. Меняется значимость геоэкологических проблем – на первое место выходит проблема очистки воды и воздуха. Как правило, в небольших городах из-за технического устаревания очистных сооружений обостряется загрязнение окружающей среды. По-прежнему сохраняется зависимость от внешнего обеспечения энергией и продовольствием.

2. Сравнение нагрузок на природные комплексы в городах групп 2–4 (гумидные ландшафты территории зарубежной Европы) и 6–8 (семигумидные и субаридные ландшафты территории Российской Федерации) свидетельствует о различиях и роли городов в изменении природных процессов. Эти различия обусловлены не столько уровнями социально-экономического развития (практически они почти однородны), сколько отражают закономерности секторально-зонального характера. Приуроченность ландшафтов европейской части России к переходному сектору суббореального подпооя сказывается в первую очередь на климатогенных природных показателях – осадках, теплообеспеченности, испаряемости, стоке. Поэтому меняется и доля антропогенной составляющей в энергетических потоках современных ландшафтов.

3. Дифференциация городов по изменению природных материальных и энергетических потоков и по силе их воздействия на окружающую среду позволяет использовать эти изменения в качестве классификационных признаков для уточнения и разработки системы мелкомасштабной классификации городских геосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ермолаева П.О. Социально-экологический метаболизм городов // Социологическая наука и социальная практика. 2015. № 3(11). С. 34–50.

Курбатова А.С., Башкин В.Н., Мягков М.С., Савин Д.С. Экологические решения в Московском мегаполисе. Смоленск: Маджента, 2004. 620 с.

- Никуличев Ю.В. Управление отходами. Опыт Европейского союза. Аналит. обзор / РАН. ИНИОН. Центр науч.-информ. исслед. глоб. и регионал. пробл. Отд. проб. европ. безопасности. М., 2017. 55 с.
- Романова Э.П., Алексеева Н.Н., Аршинова М.А. Физическая география материков и океанов. Т. 1. Кн. 1. Дифференциация и развитие ландшафтов суши Земли. Европа. Азия. М.: Изд. центр «Академия», 2014. 464 с.
- Романова Э.П., Аршинова М.А., Комарова Т.В. Техногенные городские геосистемы: подходы к мелкомасштабной классификации // Теоретические и прикладные проблемы географической науки: демографический, социальный, правовой, экономический и экологический аспекты: материалы международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 1 / отв. ред. Н.В. Яковенко. Воронеж, 2019. С. 305–310.
- Яницкий О.Н. Метаболическая концепция современного города // Социологическая наука и социальная практика. 2013. № 3. С. 16–32.
- Castan B., Allen V.A., Rapoport E. Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism, *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16(6), p. 851–861.
- Conke L.S., Ferreira T.L. Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development, *Environ. Pollut.*, 2015, vol. 202, p. 146–152.
- Decker E.H., Elliot S., Smith F.A., Blake D.R., Rowland F.S. Energy and material flow through the urban ecosystem, *Annu. Rev. Energy Environ.*, 2000, vol. 25, p. 685–740.
- Deilmann C. Urban Metabolism and the Surface of the City, *Guiding Principles for Spatial Development in Germany. German Annual of Spatial Research and Policy*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 1–16.
- Eurostat regional yearbook 2019, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2019, 226 p.
- Kennedy C., Stewart I.D., Ibrahim N., Facchini A., Mele R. Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities. *Ecol. Indic.*, 2014, vol. 47, p. 7–15.
- Pincetl S., Bunje P., Holmes T. An Expanded Urban Metabolism Method: Toward a Systems Approach for Assessing Urban Energy Processes and Causes, *Landscape and Urban Planning*, 2012, vol. 107, p. 193–202.
- Pires A., Martinho G., Chang N.-B. Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques, *Journal of Environmental Management*, 2011, no. 4, p. 1033–1050.
- Shahrokni H., Lazarevic D., Brandt N. Smart Urban Metabolism: Towards a Real-Time Understanding of the Energy and Material Flows of a City and Its Citizens, *Journal Urban Technol.*, 2015, vol. 22, p. 65–86.
- Waste prevention in Europe – the status in 2014, EEA Report, no. 6, European Environment Agency, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2015, p. 7.
- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420), United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, United Nations, 2019.
- Xuemei Bai Eight energy and material flow characteristics of urban ecosystems, *Ambio*, 2016, vol. 45, p. 819–830.
- Zhang Y. Urban metabolism: A review of research methodologies, *Environ. Pollut.*, 2013, vol. 178, p. 463–473.
- Электронные источники
Вода России. URL: https://water-rf.ru/Регионы_России (дата обращения 22.11.2020).
- Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в 2017 году. Минэнерго РФ. М., 2018. 263 с. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/2388dff12e9df8f2a9abc4f2b19bf9dd/energyefficiency2018.pdf> (дата обращения 22.11.2020).
- Кондратенко Т. «Мусорный» вопрос: почему буксует реформа обращения с отходами? // Климат России, 6 марта 2017. URL: <http://climaterussia.ru/politika-i-finansy> (дата обращения 22.11.2020).
- Состав пищевых веществ и структура энергетической ценности по основным группам пищевых продуктов. URL: https://www.gks.ru/bgd/regl/b07_101/IssWWW.exe/Stg/1-6.htm (дата обращения 22.11.2020).
- Emission Database for Global Atmospheric Research, URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/> (дата обращения 22.11.2020).
- Energy use (kg of oil equivalent per capita), URL: <https://datahub.io/world-bank/eg.use.pcap.kg.oe#resource-data> (дата обращения 22.11.2020).
- EU greenhouse gas inventory, 2018, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory> (дата обращения 22.11.2020).
- Europe Cities by Population, 2020, *World population review*, URL: <https://worldpopulationreview.com/continents/cities/europe> (дата обращения 22.11.2020).
- FAOSTAT, 2018, URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (дата обращения 22.11.2020).
- Fresh water abstraction by source per capita, URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00003/default/table?lang=en> (дата обращения 22.11.2020).
- Kennedy Ch.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K., Dubeux C., La Rovere E.L., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., Otharan F.G., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes G., Sahin A.D. Energy and material flows of megacities, *PNAS*, 2015, vol. 112, no. 19, p. 5985–5990, DOI: 10.1073/pnas.1504315112 (дата обращения 22.11.2020).
- The Largest cities in the world by land area, population and density, *Citymayors Statistics*, 2018, URL: <http://www.citymayors.com/statistics/largest-cities-area-125.html> (дата обращения 22.11.2020).
- Municipal waste management across European countries, 2016, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-across-european-countries> (дата обращения 22.11.2020).
- Eurostat: database, URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/data/database> (дата обращения 22.11.2020).

Поступила в редакцию 03.05.2020

После доработки 15.04.2021

Принята к публикации 02.06.2021

GEOECOLOGICAL SYSTEMATIZATION AND CLASSIFICATION OF URBAN GEOSYSTEMS BASING ON THE ANALYSIS OF MATERIAL AND ENERGY FLOWS

E.P. Romanova¹, M.A. Arshinova²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography of the World and Geoecology*

¹ *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: romanova@kmail.ru*

² *Senior Scientific Researcher; e-mail: amari_geo@mail.ru*

The paper presents new approaches to taxonomy and classification of urban landscapes which are the most significant transformers of natural geosystems. Two groups of energy and material flows, i.e. transformed and autonomous, are identified in urban areas. The first include, for example, water consumption, final energy consumption and others. Autonomous flows that did not exist in the natural landscapes are, for example, the concentration of solid waste or the emission of greenhouse gases. Of 819 European cities with a population of over 100 thousand people, key cities for four UN statistical categories (over 5 million people; from 1 to 5 million people; from 500 thousand to 1 million people; from 100 thousand to 500 thousand people) were selected. Specific features of material and energy flows in the cities of foreign Europe and the European part of Russia with different population numbers were revealed. Cities of the first category are characterized by maximum specific indicators of all material and energy flows, both natural-anthropogenic and autonomous. In cities belonging to the second category the energy load on the territory is significantly reduced. For cities of the third category, the most acute geo-environmental problems are food supply, drinking water supply, disposal of domestic waste, and in the cities of the fourth category water and air treatment are the top priority. The parameters of material and energy flows transformation in urban areas and the calculated indicators of their environmental impact make it possible to establish classification characteristics for the refinement and development of the small-scale classification of urban geosystems.

Keywords: modern landscapes, urban geosystems, energy flows, material flows, geoecological problems

REFERENCES

- Castan B., Allen V.A., Rapoport E. Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism, *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16(6), p. 851–861.
- Conke L.S., Ferreira T.L. Urban metabolism: Measuring the city's contribution to sustainable development, *Environ. Pollut.*, 2015, vol. 202, p. 146–152.
- Decker E.H., Elliot S., Smith F.A., Blake D.R., Rowland F.S. Energy and material flow through the urban ecosystem, *Annu. Rev. Energy Environ.*, 2000, vol. 25, p. 685–740.
- Deilmann C. Urban Metabolism and the Surface of the City, *Guiding Principles for Spatial Development in Germany. German Annual of Spatial Research and Policy*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, p. 1–16.
- Eurostat regional yearbook 2019*, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2019, 226 p.
- Evropejskaya praktika obrascheniya s onkhodami: problem, resheniya, perspektivy* [European practice of waste management; problems, solutions, prospects], St. Petersburg, Regional Energy Partnership Publ., 2005, 74 p. (In Russian)
- Kennedy C., Stewart I.D., Ibrahim N., Facchini A., Mele R. Developing a multi-layered indicator set for urban metabolism studies in megacities, *Ecol. Indic.*, 2014, vol. 47, p. 7–15.
- Kurbatova A.S., Bashkin V.N., Myagkov M.S., Savin D.S. *Ekologicheskie resheniya v Moskovskom megapolise* [Environmental solution in the Moscow metropolitan area], Smolensk, Madzhenta Publ., 2004, 620 p. (In Russian)
- Nikulichev Yu.V. *Upravlenie onkhodami. Opyt Evropejskogo soyuza* [Waste management. The EU experience], Moscow, INION Publ., 2017, 55 p. (In Russian)
- Pincetl S., Bunje P., Holmes T. An Expanded Urban Metabolism Method: Toward a Systems Approach for Assessing Urban Energy Processes and Causes, *Landscape and Urban Planning*, 2012, vol. 107, p. 193–202.
- Pires A., Martinho G., Chang N.-B. Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques, *Journal of Environmental Management*, 2011, no. 4, p. 1033–1050.
- Romanova E.P., Alekseeva N.N., Arshinova M.A. *Fizicheskaya geografiya materikov i okeanov*, T. 1, Kn. 1, *Differentsiatsiya i razvitie landshaftov sushi Zemli. Evropa. Aziya* [Physical geography of continents and oceans, vol. 1, book 1, Differentiation and evolution of terrestrial landscapes of the Earth. Europe. Asia], Moscow, Akademia Publishing Centre, 2014, 464 p. (In Russian)
- Romanova E.P., Arshinova M.A., Komarova T.V. [Technogenic urban geosystems: approaches to small-scale classification], *Teoreticheskie i prikladnye problemy geograficheskoy nauki; demograficheskij, sotsialnyj, pravovoj, ekonomicheskij i ekologicheskij aspekty* [Theoretical and applied issues of geographical science: demographic, social, legal, economic and environmental aspects], N.V. Yakovenko (ed.), vol. 1, Voronezh, 2019, p. 305–310. (In Russian)
- Shahrokni H., Lazarevic D., Brandt N. Smart Urban Metabolism: Towards a Real-Time Understanding of the Energy and Material Flows of a City and Its Citizens*, *Journal Urban Technol.*, 2015, vol. 22, p. 65–86.
- Waste prevention in Europe – the status in 2014. EEA Report, no. 6, European Environment Agency, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2015, p. 7.

- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, United Nations, 2019.
- Xuemei Bai. Eight energy and material flow characteristics of urban ecosystems, *Ambio*, 2016, vol. 45, p. 819–830.
- Yanitsky O.N. Metabolicheskaya kontseptsiya sovremenno-go goroda [Metabolic concept of modern city], *Sociological Science and Social Practice*, 2013, no. 3, p. 16–32. (In Russian)
- Zhang Y. Urban metabolism: A review of research methodologies, *Environ. Pollut.*, 2013, vol. 178, p. 463–473.
- Web sources*
- Emission Database for Global Atmospheric Research, URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/> (access date 22.11.2020).
- Energy use (kg of oil equivalent per capita), URL: <https://datahub.io/world-bank/eg.use.pcap.kg.oe#resource-data> (access date 22.11.2020).
- EU greenhouse gas inventory, 2018, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory> (access date 22.11.2020).
- Europe Cities by Population, 2020, *World population review*, URL: <https://worldpopulationreview.com/continents/cities/europe> (access date 22.11.2020).
- Eurostat: database, URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/data/database> (access date 22.11.2020).
- FAOSTAT, 2018, URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (access date 22.11.2020).
- Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii energosberezheniya i povyshenii energeticheskoy effektivnosti v 2017 godu [State report on power saving and increasing of energy efficiency in 2017], Minenergo RF, Moscow, 2018, URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/2388dff12e9df8f2a9abc4f2b19bf9dd/energyefficiency2018.pdf> (access date 22.11.2020). (In Russian)
- Kennedy Ch.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K., Dubeux C., La Rovere E.L., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., Otharan F.G., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes G., Sahin A.D. Energy and material flows of megacities, *PNAS*, 2015, vol. 112, no. 19, p. 5985–5990, DOI: 10.1073/pnas.1504315112 (access date 22.11.2020).
- Kondratenko T. “Musornyj” vopros: pochemu buksuet reforma obrascheniya s otkhodami? [Problems of wastes: why is the reform of waste management stalled?], *Klimat Rossii*, 6 March 2017, URL: <http://climaterussia.ru/politika-i-finansy/> (access date 22.11.2020). (In Russian)
- Municipal waste management across European countries, 2016, URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-across-european-countries> (access date 22.11.2020).
- Sostav pischevykh produktov i struktura energeticheskoy tsennosti po osnovnym gruppam pischevykh produktov [Composition of foodstuffs and the structure of energy value for main groups of foodstuffs], URL: https://www.gks.ru/bgd/regl/b07_101/IssWWW.exe/Stg/1-6.htm/ (access date 22.11.2020). (In Russian)
- The Largest cities in the world by land area, population and density, *Citymayors Statistics*, 2018, URL: <http://www.citymayors.com/statistics/largest-cities-area-125.html> (access date 22.11.2020).
- Voda Rossii [Water in Russia], URL: <https://water-ru.ru/Regiony/Rossii> (access date 22.11.2020). (In Russian)

Received 03.05.2020

Revised 15.04.2021

Accepted 02.06.2021