

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПО ВЛИЯНИЮ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛУГИ ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА ЛОКАЛЬНЫМИ НАЗЕМНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

В статье проведена сравнительная экологическая оценка деятельности объектов тепловой энергетики по возможности депонирования антропогенного углерода, образующегося в результате сжигания ископаемых видов топлива при производстве электроэнергии локальными наземными экосистемами. Определены наиболее устойчивые экосистемы (с наибольшими пулами углерода в фитомассе и гумусе почв). В результате системного анализа основных производственных показателей исследуемых ТЭС выделены их 34 функционально-экологические группы, дифференцированные в зависимости от типа объекта, вида используемого топлива, численности населения близлежащих поселений. На основании методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов осуществлены расчеты индекса углеродной нагрузки IndexL, с детальной дифференциацией воздействия ТЭС и оценкой экологического сервиса (услуги) депонирования углерода локальными наземными экосистемами при выделении 4 групп углеродной нагрузки (высокая, средняя, низкая и оптимальная). В то же время необходимо учитывать не только локальную, но и региональную потенциальную емкость наземных экосистем, а также географическое расположение объектов энергетики в Российской Федерации и их мощность. Наличие большого количества лесов в азиатской части страны позволяет обеспечить повышенную буферность их наземных экосистем в зоне действия объектов тепловой энергетики.

The article provides a comparative environmental assessment of the thermal energy facilities activities in the local terrestrial ecosystems possibility to sink the anthropogenic carbon generated by fossil fuels burning during electricity production. The most stable ecosystems were identified (with the highest carbon pools in phytomass and soil humus). System analysis result of the main production indicators of the investigated TPP results in 34 functional-ecological groups, differentiated by the type of facility, used fuel, and the population of nearby settlements. Due to the manuals and guidelines for the quantitative assessment of greenhouse gas emissions, the IndexL (carbon load index) was calculated to differentiate in detail the degree of thermal power plants impact on the carbon deposition ecoservice by local terrestrial ecosystems with allocation of 4 carbon load groups (high, medium, low and optimal). At the same time, it is necessary to take into account not only the local potential capacity of terrestrial ecosystems, but also the regional one, as well as the geographical location of energy facilities in the Russian Federation and their capacity. The presence of a large number of forest ecosystems in the Asian part of the country allows us supporting their increased buffering in the TPP impact areas.

Ключевые слова: экологическая оценка, депонирование углерода, ТЭС, энергетика, экосистемные услуги, экосистема.

Keywords: environmental assessment, carbon sequestration, thermal power plant, energy, ecosystem services.

Г. Е. Артамонов, специалист
информационно-аналитического отдела
Россельхознадзора, rykola@list.ru,
И. И. Васенев, доктор биологических наук,
профессор, заведующий кафедрой экологии
факультета почвоведения, агрохимии
и экологии РГАУ-МСХА
имени К. А. Тимирязева,
В. А. Гутников, кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по научной и учебной работе
ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»,
г. Москва, Российская Федерация

Введение. Одной из основных экологических проблем современности является глобальное изменение климата, в значительной мере связанное с выбросами антропогенного углерода [1].

Основными источниками эмиссии антропогенного углерода в мире являются предприятия энергетической отрасли, например, расположенная на о. Тайвань угольная Тайчжунская ТЭС является самым крупным производителем атмосферного диоксида углерода (установленная мощность составляет 5800 МВт, к 2030 году планируется увеличение до 7400 МВт) [2].

В Российской Федерации объекты тепловой энергетики также занимают лидирующие позиции по уровню выбросов парниковых газов. Так, по данным наблюдений сети Росгидромета и годовым отчетам Минприроды России в крупнейших городах страны наблюдается устойчивая тенденция к превышению ПДК по содержанию в атмосфере вредных веществ, и остается значительной доля ТЭС в региональных показателях загрязнения атмосферы [3]. Основную часть вредных выбросов в атмосферу вследствие сжигания ископаемых видов топлива составляют SO_2 , NO_x , CO , твердые частицы и парниковые газы, такие как CO_2 [4, 15].

По данным национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом [5], анализ динамики выбросов парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в Российской Федерации в секторе «энергетика» показывает существенное снижение выбросов к 2017 году в сравнении с показателем 1990 года, однако начиная с 2013 года отмечен незначительный рост показателя выбросов парниковых газов (рис. 1).

В 2015 году в Париже в ходе конференции по климату взамен Киотского протокола было при-

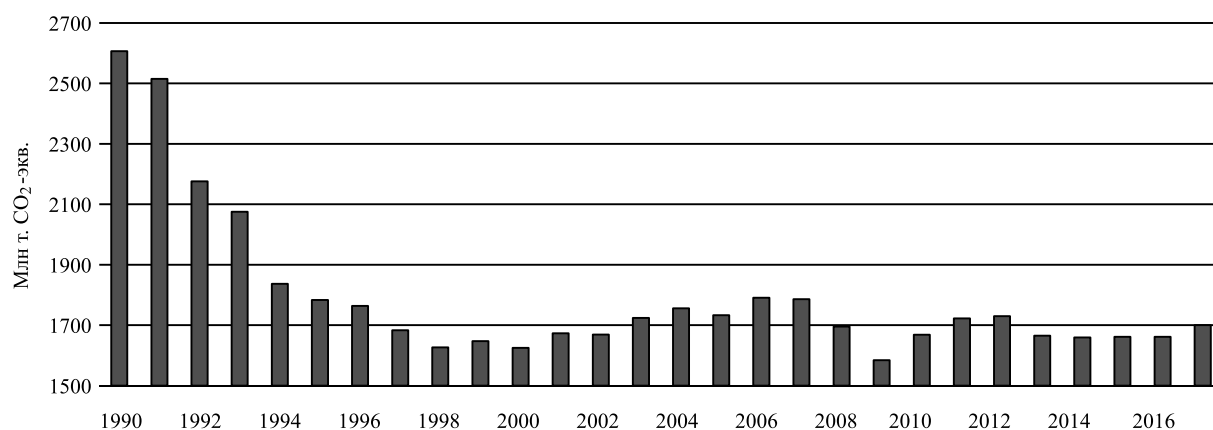


Рис. 1. Динамика выбросов парниковых газов в секторе «Энергетика» 1990–2017 гг. (по данным <https://unfccc.int/>)

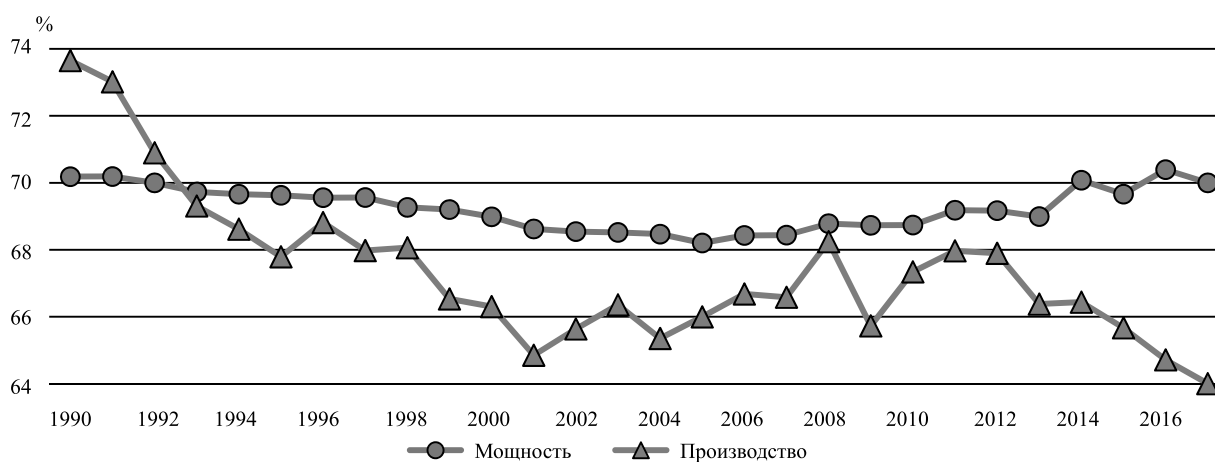


Рис. 2. Динамика удельного веса мощности и производства электроэнергии в России на ТЭС за период 1990–2017 гг.

нято Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулирующие меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020 года.

Ключевыми положениями соглашения, подписанного Россией 22 апреля 2016 года, и принятого Постановлением Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2019 № 1228, являются регулирование прироста глобальной средней температуры в пределах 2 °С сверх доиндустриальных уровней и сбалансирование выбросов парниковых газов, получаемых в результате промышленной деятельности человека, до уровня, который экосистемы могут переработать естественным образом [6].

Тепловые электростанции составляют основу генерирующих мощностей России и имеют стратегическое значение в социально-экономическом развитии субъектов РФ [7]. В 2017 году российскими тепловыми электростанциями произведено 703 млрд кВт·ч электроэнергии, что составляет 64 % в общем объеме производства электроэнергии в России. Согласно данным Росстата по со-

стоянию на 01.01.2018 суммарная установленная мощность ТЭС составляет 190 ГВт, или 70 % от общей установленной мощности электростанций России.

Проведенный анализ динамики установленной мощности ТЭС и производства электроэнергии показал, что с 2014 года наметился устойчивый спад производства электроэнергии, в то время как установленная мощность продолжает увеличиваться (рис. 2). Поэтому при вводе в эксплуатацию новых мощностей имеется возможность поэтапной модернизации или вывода из эксплуатации энергетических объектов с устаревшими технологиями и необоснованно высоким уровнем воздействия на окружающую среду.

При определении очередности модернизации или исключения ТЭС целесообразно обращать внимание на соотношение оказываемой ими антропогенной нагрузки на локальные экосистемы и удельную возможность окружающих их наземных экосистем воспринимать эти нагрузки.

Наземные экосистемы России обладают значительным природно-ресурсным потенциалом

для депонирования углерода, который образовывается в результате хозяйственной деятельности человека. Данный процесс регулирует глобальное изменение климата путем «стока» парниковых газов [8].

Леса, болота и сельскохозяйственные экосистемы (пашни и пастбища) являются наиболее известными формами наземного накопления углерода и способны накапливать его большое количество в высоких концентрациях. Способность наземных экосистем служить поглотителем или хранилищем CO_2 и других парниковых газов в значительной степени зависит от физико-географических и природно-климатических особенностей территории, а также от их текущего состояния и уровня деградации. Поэтому сохранение и восстановление наземных экосистем с высоким потенциалом поглощения и хранения антропогенного углерода представляется важной задачей в развитии концепции экосистемных услуг [9].

Цель исследования — сравнительная экологическая оценка деятельности объектов тепловой энергетики с точки зрения возможности депонирования окружающими их локальными наземными экосистемами антропогенного углерода, образующегося при производстве электроэнергии в результате сжигания ископаемых видов топлива (природный газ, уголь, мазут).

Объект и методы исследования. Исследования проведены на основе системного анализа данных годовых отчетов энергогенерирующих компаний РФ о деятельности 195 ТЭС суммарной установленной электрической мощностью более 85 ГВт и годовой выработкой электроэнергии около 331 млрд кВт·ч, что составляет почти половину всей электроэнергии, выработанной на ТЭС. При этом анализ 195 действующих объектов энергетики показал, что их средний показатель коэффициента установленной мощности (КИУМ) составляет только около 44 %. При увеличении имеющегося резерва КИУМ до 70 % производство электроэнергии составит более 1000 млрд кВт·ч, что позволит покрыть более 92 % потребности страны в электроэнергии.

Для оценки экосистемных услуг использовалась классификация и схема распределения наземных экосистем из «Экологического Атласа России» под редакцией Н. С. Касимова и В. С. Тикунова [10], классификация и структура почвенного покрова из «Национального атласа почв Российской Федерации» под редакцией Г. В. Добровольского и С. А. Шобы [11].

Природно-климатические условия формируют углерододепонирующие способности наземных экосистем. Для их оценки использованы содержание гумуса в кг/м^2 (Ho), запас фитомассы в

кг/м^2 (Bo) и расчеты В. А. Гутникова [1] за рекомендуемый Всемирной метеорологической организацией (ВМО) период климатической нормы (1961—1990 гг.). «Естественный» углерод рассчитывается по формуле (1), предложенной в «Едином государственном реестре почвенных ресурсов России» [10]:

$$C_{nat} = (Bo \cdot 0,5 \cdot S) + (Ho \cdot 0,58 \cdot S), \quad (1)$$

где C_{nat} — углерод «естественный»; S — площадь используемых локальных наземных экосистем; 0,5 и 0,58 — коэффициенты для перевода в углеродные единицы [12].

Для расчета «антропогенного» углерода от выбросов загрязняющих веществ ТЭС использованы данные потребления топлива (природный газ, уголь, мазут), которые пересчитаны по формуле (2) в углеродные единицы — в соответствии с руководством по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации, утвержденных Приказом Минприроды России от 30.06.2015 № 300 [13]:

$$C_{anth} = (C_g + C_c + C_m), \quad (2)$$

где C_{anth} — углерод «антропогенный»; C_g — углерод от сжигания природного газа; C_c — углерод от сжигания угля; C_m — углерод от сжигания мазута.

Индекс антропогенного воздействия ТЭС на экосистемную услугу по депонированию углерода ($indexL$) рассчитывается по формуле (3) как углеродная нагрузка ($load$):

$$indexL = \frac{C_{anth}}{C_{nat}}. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение. Исследуемые объекты энергетики расположены по всей стране (рис. 3) в экосистемах, характеризующихся разным экологическим потенциалом, что дифференцирует условия функционирования объектов энергетики и степень устойчивости локальных экосистем к их антропогенному воздействию.

Системный анализ производственных показателей исследуемых ТЭС (табл. 1) позволил разделить их на 34 функционально-экологические группы, дифференцированные в зависимости от структуры выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, вида используемого топлива, мощности источников выбросов, территориального расположения энергетических объектов (табл. 2).

Группа ГРЭС состоит из 34 объектов. Основная доля выработанной ГРЭС электроэнергии идет на продажу на оптовом рынке электро-

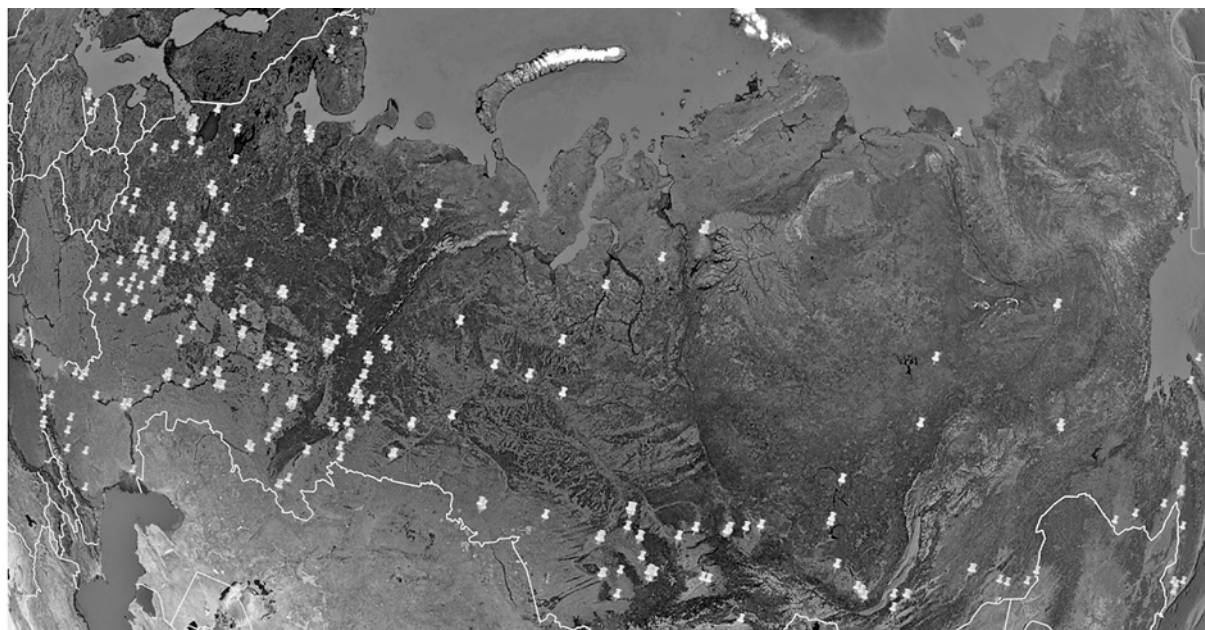


Рис. 3. Размещение исследуемых ТЭС в Российской Федерации

Таблица 1

Показатели производственной деятельности групп ТЭС

Группа		n	Мощность, МВт	Производство, млн кВт · ч	Площадь земель, га	Расход усл. топл., тыс. т.у.т. (Всего)	Выбросы всего, т в том числе:	Твердые вещества, т	Диоксид серы, т	Оксиды азота, т	Оксид углерода, т
ГРЭС	I-1-A	1	742	5320	43	1057	1062	0	0	604	459
	I-2-A	1	54	240	7	178	242	0	0	233	10
	I-2-B	1	331	792	34	594	5926	1263	1641	2972	50
	I-3-A	2	538	1568	29	711	8294	0	0	4333	3961
	I-4-A	3	2652	12 943	307	4093	8665	10	794	7616	245
	I-5-A	1	2595	5819	144	1410	5170	0	0	2621	2550
	I-5-B	3	3873	11 096	299	4958	136 195	39 160	57 891	22 661	16 483
	I-6-A	6	9369	37 785	407	12 625	24 181	5	707	23 291	180
	I-6-B	8	9337	28 487	854	11 200	254 962	67 169	133 234	47 782	6775
	I-7-A	3	3470	8414	406	2752	9271	101	36	7854	1280
	I-7-B	5	1631	7355	154	2921	46 693	15 347	17 622	12 604	1121
ТЭЦ	II-1-A	33	16 835	75 676	1074	31 474	67 020	4784	11 160	48 217	2857
	II-1-B	8	3730	17 500	523	9345	163 295	39 425	72 137	47 154	4582
	II-2-A	13	3416	12 449	660	5570	8299	9	43	6663	1583
	II-2-B	6	3077	13 704	385	6365	130 596	25 755	65 573	33 928	5342
	II-3-A	16	4122	18 226	491	7629	13 140	8	111	12 141	878
	II-3-B	3	914	3376	117	1717	31 766	8827	11 349	7722	3868
	II-3-B	1	12	16	6	122	13 680	87	11 861	1683	50
	II-4-A	21	5131	18 071	731	9879	15 674	25	832	13 958	856
	II-4-B	14	5604	22 321	693	10 632	280 644	67 867	146 618	46 501	19 661
	II-5-A	5	663	2933	224	2050	4469	891	236	3188	156
	II-5-B	12	2197	6034	664	2954	125 533	48 433	59 732	16 577	791
	II-6-A	10	1277	4043	194	1471	3043	2	65	2806	171
	II-6-B	4	685	1833	194	988	29 893	5981	20 004	3515	393
	II-6-B	1	21	41	12	52	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	II-7-A	1	270	1066	49	785	1510	0	174	1335	0
	II-7-B	3	328	1106	78	780	28 748	15 478	8793	3744	735
Промышленные	III-1-A	1	200	1258	6	489	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	III-3-A	2	643	3917	70	1369	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	III-3-B	1	101	484	14	210	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	III-4-A	1	119	965	5	264	375	0	0	232	143
	III-5-B	1	410	1467	78	719	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	III-6-A	2	505	2619	63	1394	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	III-7-A	2	344	2263	17	1525	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д

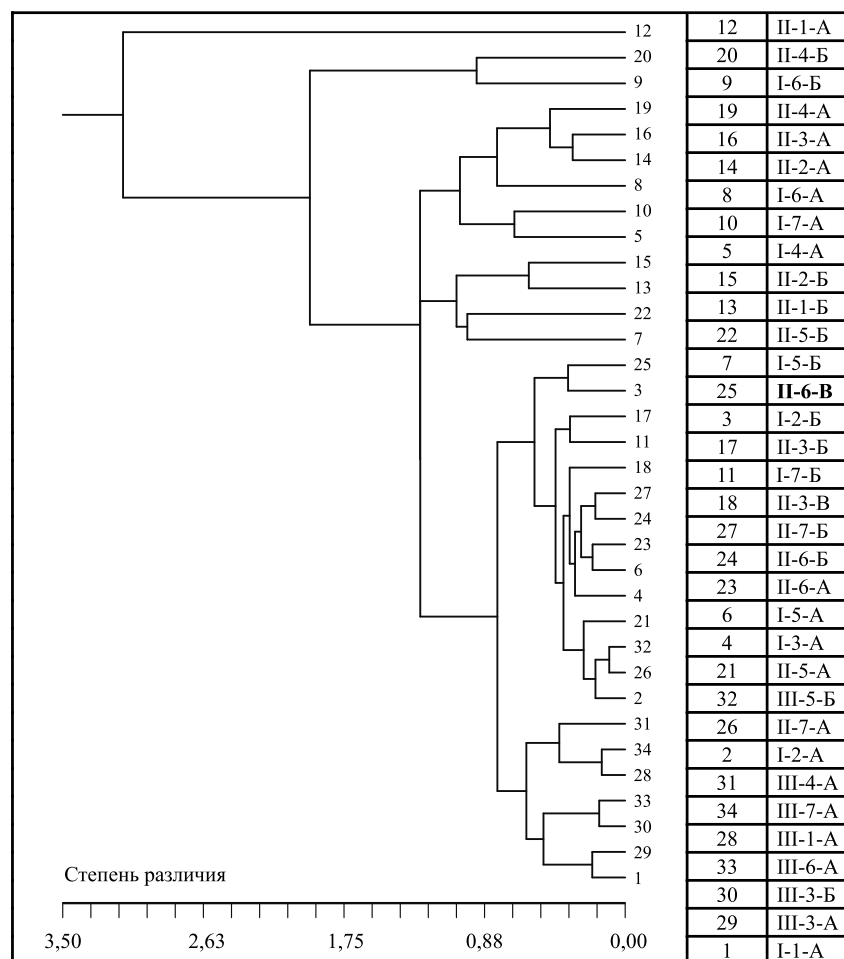


Рис. 4. Иерархический кластерный анализ подгрупп ТЭС по показателям деятельности объектов энергетики

энергии в другие регионы страны, а также для энергоснабжения крупных промышленных районов предприятий. Группа ТЭЦ включает в себя 151 объект. ТЭЦ работают в режиме когенерации с выработкой электрической и тепловой энергии.

Группа промышленных ТЭС представлена 10 объектами. К ним относятся электростанции, входящие в состав производственных предприятий, и предназначенные в основном для энергоснабжения предприятий и прилегающих к ним городских и сельских поселений.

В результате сравнительного анализа производственных и экологических показателей групп ТЭС установлены значимые корреляционные зависимости [14] производства электроэнергии от общего расхода топлива ($r = 0,988$), расхода природного газа ($r = 0,927$), а также его влияния на окружающую среду:

— выбросы углерода при сгорании природного газа ($r = 0,923$);

— выбросы оксидов азота (в пересчете на NO_2) ($r = 0,738$);

— площадь используемых земель ($r = 0,806$).

Таблица 2
Классификация исследуемых ТЭС

1 уровень (тип объекта)	2 уровень (вид топлива)	3 уровень (размер поселений)*
I — ГРЭС	I — А (природный газ) I — Б (уголь) I — В (мазут)	1 — крупнейшие свыше 1000; 2 — очень крупные 500—1000; 3 — крупные 250—500; 4 — большие 100—250; 5 — средние 50—100; 6 — малые 10—50; 7 — поселковые менее 10
II — ТЭЦ	II — А (природный газ) II — Б (уголь) II — В (мазут)	1 — крупнейшие свыше 1000; 2 — очень крупные 500—1000; 3 — крупные 250—500; 4 — большие 100—250; 5 — средние 50—100; 6 — малые 10—50; 7 — поселковые менее 10
III — Промышленные	III — А (природный газ) III — Б (уголь) III — В (мазут)	1 — крупнейшие свыше 1000; 2 — очень крупные 500—1000; 3 — крупные 250—500; 4 — большие 100—250; 5 — средние 50—100; 6 — малые 10—50; 7 — поселковые менее 10

*— В соответствии с СП 42.133330.2016 в тыс. чел.

Иерархический кластерный анализ показателей групп ТЭС позволил установить подгруппы с близкими условиями антропогенного воздействия на наземные экосистемы. В основе иерархической кластеризации выявились природно-климатические особенности территории (рис. 4).

Наиболее отличной от остальных оказалась группа (II-1-A) с 33 газовыми ТЭС, расположенными в крупнейших городах, которые, как правило, отличаются минимальными выбросами загрязняющих веществ, но в то же время имеют высокий уровень нагрузки по выбросам парниковых газов.

В верхней части дендрограммы разместились практически все группы с промышленными электростанциями. В кластеры объединились группы (III-3-B и III-6-A); (III-1-A и III-7-A). Значительная часть из них работает на природном газе. Группы угольных электростанций расположены

преимущественно в средней части дендрограммы. Наибольшее негативное воздействие на наземные экосистемы оказывают угольные ГРЭС. Они являются доминирующими ТЭС в Дальневосточном, Сибирском и Уральском федеральных округах. Поэтому экосистемы, в границах которых они функционируют, должны обладать достаточно высоким потенциалом к поглощению антропогенного углерода.

В то время как общая площадь отведенных для размещения исследуемых ТЭС земельных ресурсов составляет всего 9029 га, важно оценить уровень антропогенного воздействия ТЭС на зону их влияния, представленную разными видами экосистем, по количеству поступающего в эти экосистемы антропогенного углерода.

Типизация наземных экосистем на основе ландшафтно-экологического подхода представляет собой важную задачу территориального пла-

Таблица 3

Экологическая оценка ТЭС по воздействию на углерод депонирующую услугу

Станция	<i>C (anth)</i>	Тип экосистем*	Тип почв	<i>C (nat)</i>	<i>indexL</i>	Залесенность субъекта РФ, %**
Наибольшая нагрузка						
Читинская ТЭС-1	2098,9	Бореал. резко конт.	Чернозем. Юж.	218,6	9,603	74
Омская ТЭС-5	4582,3	Суббор. Конт.	Чернозем. Тип.	600,1	7,636	41
Астраханская ПГУ-235	289,2	Суббор. Конт.	Луговые бур.	39,6	7,299	4
Омская ТЭС-4	2332,7	Суббор. Конт.	Чернозем. Тип.	430,1	5,423	41
ГЭС-1 (г. Москва)	224,9	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	50,7	4,433	0
Абаканская ТЭС	2366,0	Суббор. Конт.	Каштан.	553,7	4,273	59
Воркутинская ТЭС-2	928,0	Субарктич.	Тундров. Глеев.	246,3	3,767	86
Красноярская ГРЭС-2	4878,4	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-таеж.	1296,8	3,762	66
Ново-Иркутская ТЭС	2959,7	Бореал. Умерен. конт.	Серые лесн.	790,5	3,744	89
Красноярская ТЭС-1	1637,3	Бореал. конт.	Чернозем. Тип.	470,4	3,481	66
Иркутская ТЭС-6	757,1	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	232,9	3,250	89
Иркутская ТЭС-1	531,8	Бореал. Умерен. конт.	Боров. пески	186,0	2,859	89
Барнаульская ТЭС-2	1100,1	Суббор. Конт.	Чернозем. Тип.	404,1	2,722	26
Красноярская ТЭС-2	2415,9	Бореал. конт.	Чернозем. Тип.	897,0	2,693	66
Наименьшая нагрузка						
Вологодская ТЭС	193,2	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	884,1	0,219	79
Липецкая ТЭС-2	379,4	Суббор. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	1794,7	0,211	7
Смоленская ТЭС-2	326,1	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	1577,6	0,207	40
Ульяновская ТЭС-2	329,7	Суббор. Умерен. конт.	Чернозем. Тип.	1652,8	0,199	26
Курская ТЭС-1	149,7	Суббор. Умерен. конт.	Чернозем. Тип.	844,6	0,177	7
Пермская ТЭС-14	263,3	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	1802,6	0,146	63
Петрозаводская ТЭС	332,9	Бореал. Умерен. конт.	Солонч. лугов.	2327,5	0,143	80
Костромская ТЭС-2	233,7	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	1747	0,134	61
Томская ТЭС-3	270,7	Бореал. Умерен. конт.	Серые лесн.	2116,5	0,128	91
Шарьинская ТЭС	73,5	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	579,5	0,127	61
Смоленская ГРЭС	373,7	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	4755,5	0,079	40
Череповецкая ГРЭС	641,9	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	8241,3	0,078	79
Псковская ГРЭС	178,4	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	3003	0,059	42
Пермская ТЭС-13	16,5	Бореал. Умерен. конт.	Дерн.-подзол.	430,9	0,038	63
ТЭС «Центральная» (г. Санкт-Петербург)	0,029	Суббор. Приокан.	Буро-таеж.	78,7	0,0004	0

* — Типы экосистем по Гудилину, 1980 г. ** — по данным земельного фонда РФ.

нирования в области энергетики, нацеленного на организацию эффективной и экологически безопасной инфраструктуры энергоснабжения и рационального использования экосистемных услуг [16].

В результате географической привязки исследуемых объектов тепловой энергетики с использованием карт продуктивности экосистем суши (<https://geographyofrussia.com>) и уровня антропогенной нагрузки на экосистемы (http://landscapeedu.ru/edu_help_fgr.shtml) определены 120 типов экосистем и 59 типов почв, в которых расположены исследуемые объекты тепловой энергетики.

Наибольшей продуктивностью обладают экосистемы, расположенные в европейской части территории страны. При этом наибольшее количество объектов ТЭС и наивысший уровень антропогенной нагрузки отмечается также в европейской части территории. При наложении данных картосхем определены «проблемные» зоны. Для системного анализа произведен расчет показателей «естественного» углерода $C(nat)$, «антропогенного» углерода $C(anth)$ и индекса углеродной нагрузки ($indexL$).

Результаты расчета индекса углеродной нагрузки для 30 ТЭС показали очень широкий диапазон его изменения в рассматриваемом ряду почв от 9,6 для южных черноземов до 0,0004 для буро-таежных почв (табл. 3).

Ранжирование исследуемых объектов ТЭС позволяет выделить среди них 4 группы: с высокой, средней, низкой и оптимальной углеродной нагрузкой на локальные экосистемы. О высокой углеродной нагрузке ТЭС на локальные наземные экосистемы позволяют судить значения $indexL$ выше 5. Средняя нагрузка характерна для значений от 2 до 5, низкая — от 1 до 2. Оптимальная нагрузка, без негативных последствий, отмечается при значении $indexL$ менее 1.

При этом углеродная нагрузка на отдельные локальные экосистемы может быть выше порога их самовосстановления, что приведет к деградации наземных экосистем, находящихся в зоне воздействия. Однако за счет близлежащих компенсирующих лесных территорий углеродная нагрузка может быть частично или полностью нейтрализована [17].

Наибольшие значения индекса углеродной нагрузки наблюдаются у угольных тепловых электростанций средней мощности (до 1000 МВт), расположенных в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах. Так, например, в районе Читинской ТЭЦ-1 выбросы антропогенного уг-

лерода в более чем 9 раз превышают способность локальных наземных экосистем к депонированию углерода. При этом общая обесценность соседних территорий позволяет говорить о возможности полного компенсирования антропогенной углеродной нагрузки за счет лесных экосистем региона размещения ТЭС.

Объекты с наименьшими показателями индекса углеродной нагрузки представлены газовыми электростанциями, преимущественно расположенными в Северо-Западном и Центральном федеральных округах.

Заключение. Проведенная сравнительная экологическая оценка деятельности объектов тепловой энергетики позволила дифференцировать их по уровню воздействия антропогенного углерода на экосистемную услугу по депонированию углерода наземными экосистемами, при разработке и корректировке региональных энергетических стратегий.

В результате системного анализа основных производственных показателей исследуемых ТЭС выделены 34 функционально-экологические группы, дифференцированные в зависимости от типа объекта, вида используемого топлива, численности населения близлежащих поселений с оценкой групп по показателям выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, мощности источников выбросов, производства электроэнергии.

Кластерный анализ позволил выделить наиболее экологически чистые газовые электростанции, расположенные в крупнейших городах, которые отличаются минимальными выбросами загрязняющих веществ, но в то же время имеют высокий уровень нагрузки по выбросам парниковых газов. Четко сгруппированы доминирующие в Дальневосточном, Сибирском и Уральском федеральных округах угольные электростанции.

Предложенный и апробированный в данной работе индекс углеродной нагрузки ($indexL$) позволил детально дифференцировать степень воздействия ТЭС на экологическую услугу депонирования углерода локальными наземными экосистемами с выделением 4 групп углеродной нагрузки (высокая, средняя, низкая и оптимальная).

В то же время необходимо учитывать не только локальную, но и региональную потенциальную емкость наземных экосистем, а также географическое расположение объектов энергетики в Российской Федерации и их мощность. Наличие большого количества лесов в азиатской части страны позволяет обеспечить повышенную буферность их наземных экосистем в зоне действия объектов тепловой энергетики.

Библиографический список

1. Артамонов Г. Е., Гутников В. А. Экологические принципы оптимизации воздействия объектов энергетики на экосистемы // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии № 2 (22), 2018 (апрель—июнь) С. 16—27.
2. World Energy Outlook 2018. — режим доступа: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>.
3. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2017 год. — режим доступа: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/90/?year=2017&ID=90>.
4. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2016». — СПб. ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2017 г. С. 228.
5. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990—2017 гг. — Москва. ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2018 г. С. 476.
6. Васенев В. И., Ван Ауденховен А. П., Ромзайкина О. Н., Гаджагаева Р. А. // Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1177—1192.
7. Российский статистический ежегодник. 2017: Стат. сб. / Росстат. Р76 М., 2017. — 686 с.
8. Morel J. L., Chenu C., Lorenz K. Ecosystem services provided by soils in urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMAS). J. Soil Sedim. V. 15. P. 1659—1666 (2015).
9. Archer D., Dodman D. Making capacity building critical: Power and justice in building urban climate resilience in Indonesia and Thailand. Urban. Clim. V. 14. P. 68—78 (2015).
10. Экологический атлас России / А. Х. Аджиев, С. А. Бартаев, М. Ю. Беккиев и др. — ООО «Феория» Москва, 2017. — 510 с.
11. Национальный атлас почв Российской Федерации / С. А. Шоба, Г. В. Добровольский, И. О. Алябина и др. — Астрель: АСТ Москва, 2011. — 632 с.
12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. — режим доступа: <http://egrpr.soil.msu.ru/index.php>.
13. Приказ Минприроды России от 30.06.2015 № 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации» / Официальный интернет-портал правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>, 17.12.2015.
14. Артамонов Г. Е., Гутников В. А. Агроэкосистемы для объектов тепловой энергетики // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 8. С. 26—39.
15. Raymond C. M., Frantzeskaki N., Kabisch N., Berry P., Breil M., mNita M. R., Geneletti D., Calafapietra C.: A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. Environ. Sci. Policy. V. 77. P. 15—24 (2017).
16. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group 1 Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Stocker T. F., Qin D., Plattner G., Tignor M Allen S. K. e. a. — Cambridge University Press, UK and USA, 2013. — 869 p.
17. Vasenev I. I., Vasenev V. I., Valentini R. Agroecological issues of soil carbon pools and GHG fluxes analysis in frame of regional ecological monitoring system RusFluxNet // Агроэкология. 2014, № 1. P. 8—12.

ENVIRONMENTAL EVALUATION OF THERMAL ENERGY FACILITIES INFLUENCE ON ECOLOGICAL SERVICES OF CARBON DEPOSITION BY LOCAL TERRESTRIAL ECOSYSTEMS

G. E. Artamonov, Expert, Information and Analytical Department of the Rosselkhoz nadzor, rykola@list.ru, Moscow, Russian Federation, rykola@list.ru,

I. I. Vasenev, Ph. D. (Biology), Dr. Habil., Professor, Head of Ecology Department, the Faculty of Soil Science, Agrochemistry and Ecology, RGAU-MSHA named after K. A. Timiryazev,

V. A. Gutnikov, Ph. D. (Engineering), Deputy Director for Scientific and Educational Work, FSBI “TsNIIP Minstroy Russia”, Moscow, Russian Federation

References

1. Artamonov G. E., Gutnikov V. A. Ekologicheskie principy optimizatsii vozdejstviya ob'ektov energetiki na ekosistemy. *Biosferная совместимость: человек, регион, технологии*. No. 2 (22), 2018 (aprel'—iyun') S. 16—27 [Environmental principles of optimizing the impact of energy facilities on ecosystems]. *Biosphere compatibility: people, region, technology*. No. 2 (22), 2018 (April—June). P. 16—27 [in Russian].
2. World Energy Outlook 2018. — режим доступа: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>.
3. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Rossijskoj Federacii za 2017 god. — rezhim dostupa: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/90/?year=2017&ID=90> [Overview of the state and environmental pollution in the Russian Federation for 2017] [in Russian].
4. Ezhegodnik “Sostoyanie zagryazneniya atmosfery v gorodah na territorii Rossii za 2016”. [Yearbook “The State of Atmospheric Pollution in Cities in Russia for 2016”]. SPb. FSBI GGO Roshydromet, 2017. P. 228 [in Russian].

5. Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemym Monreal'skim protokolom za 1990—2017 gg. [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990—2017]. Moscow. FSBI “IGKE of Roshydromet and RAS”, 2018. P. 476 [in Russian].
6. Vasenev V. I., Van Audenhoven A. P., Romzaikina O. N., Gadzhiagaeva R. A. Ekologicheskie funkcii i ekosistemnye servisy gorodskih i tekhnogennyh pochv: ot teorii k prakticheskomu primeneniyu (obzor) // *Pochvovedenie*. [Ecological functions and ecosystem services of urban and technogenic soils: from theory to practical application (review). *Soil science*.] 2018. No. 10. P. 1177—1192 [in Russian].
7. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik. 2017: Stat. sb. [Russian statistical yearbook]. Rosstat. P76 Moscow, 2017. 686 p. [in Russian].
8. Morel J. L., Chenu C., Lorenz K. Ecosystem services provided by soils in urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMAS). *J. Soil Sedim.* V. 15. P. 1659—1666 (2015).
9. Archer D., Dodman D. Making capacity building critical: Power and justice in building urban climate resilience in Indonesia and Thailand. *Urban. Clim.* V. 14. P. 68—78 (2015).
10. Ekologicheskij atlas Rossii / A. H. Adzhiev, S. A. Bartalyov, M. Yu. Bekkiev i dr. [Ecological atlas of Russia / A. Kh. Adzhiev, S. A. Bartalyov, M. Yu. Bekkiev, et al.]. Moscow, Theoria LLC. 2017. 510 p. [in Russian].
11. Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii / S. A. Shoba, G. V. Dobrovolskij, I. O. Alyabina i dr. [National Atlas of Soils of the Russian Federation / S. A. Shoba, G. V. Dobrovolsky, I. O. Alyabin, et al.]. Moscow, Astrel: AST. 2011. 632 p. [in Russian].
12. Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii. — rezhim dostupa: <http://egrpr.soil.msu.ru/index.php> [Unified State Register of Soil Resources of Russia]. Electronic resource available at: <http://egrpr.soil.msu.ru/index.php>
13. Prikaz Minprirody Rossii ot 30.06.2015 N 300 “Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy i rukovodstva po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema vybrosov parnikovyh gazov organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi hozyajstvennuyu i inuyu deyatel'nost' v Rossijskoj Federacii” / Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii <http://www.pravo.gov.ru>, 17.12.2015 [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 30.06.2015 N 300 “On approval of guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas emissions by organizations engaged in economic and other activities in the Russian Federation”]. Available at: Official Internet portal of legal information <http://www.pravo.gov.ru>, 12/17/2015 [in Russian].
14. Artamonov G. E., Gutnikov V. A. Agroekosistemy dlya ob'ektov teplovoj energetiki // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Agroecosystems for thermal energy facilities]. *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2018. Vol. 32. No. 8. P. 26—39 [in Russian].
15. Raymond C. M., Frantzeskaki N., Kabisch N., Berry P., Breil M., mNita M. R., Geneletti D., Calfapietr C.: A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environ. Sci. Policy*. 2017. Vol. 77. P. 15—24.
16. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group 1 Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Stocker T. F., Qin D., Plattner G., Tignor M Allen S. K. e. a. Cambridge University Press, UK and USA, 2013. 869 p.
17. Vasenev I. I., Vasenev V. I., Valentini R. Agroecological issues of soil carbon pools and GHG fluxes analysis in frame of regional ecological monitoring system RusFluxNet. *Agroecology*. 2014. No. 1. P. 8—12.