

**О.П. ОСИПОВА**Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, olga@irigs.irk.ru**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ  
РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АТМОСФЕРЫ**

*Представлены результаты исследования способности атмосферы к самоочищению в городах Иркутске, Пекине, Улан-Баторе за летний и зимний сезоны 2017–2018 гг. Критерием оценки самоочищения атмосферы был выбран метеорологический потенциал атмосферы (МПА). Показано, что в летний сезон 2017 г. над территорией Иркутска и Улан-Батора преобладали метеорологические условия, благоприятные для рассеивания примесей в атмосфере. Летом в Иркутске МПА составил 0,99, в Улан-Баторе — 0,78. В Пекине метеорологические условия летнего сезона 2017 г. и зимнего 2017–2018 г. не способствовали самоочищению атмосферы от загрязнения. Летом в Пекине МПА изменялся от 2,14 до 4,66. За зимние месяцы во всех трех городах МПА > 1, что свидетельствует о накоплении примесей в атмосфере за этот сезон. В Улан-Баторе сложились неблагоприятные условия для самоочищения: максимальный показатель МПА (9,5) наблюдался в декабре. Самый большой вклад в ухудшение рассеивающей способности атмосферы Улан-Батора зимой внесли скорости ветра 0–1 м/с. Выявлено, что максимальное накопление загрязняющих веществ в атмосфере над Пекином происходит зимой. Значение МПА изменялось от 15,0 в феврале до 19,03 в декабре. Средний МПА за зимние месяцы составил 16,68. Самый большой вклад в сложившиеся неблагоприятные метеорологические условия Пекина в декабре–феврале внесли туманы. Особенности атмосферной циркуляции, ветровой режим, туман и осадки сформировали МПА Иркутска, Улан-Батора и Пекина за рассматриваемый период.*

*Ключевые слова: метеорологический потенциал атмосферы, неблагоприятные метеорологические условия, антициклон, штиль, туман, осадки.*

**O.P. OSIPOVA**V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, olga@irigs.irk.ru**METEOROLOGICAL POTENTIAL  
OF THE DIFFUSING CAPACITY OF THE ATMOSPHERE**

*Presented are the results from investigating the atmospheric self-purification capacity over the cities of Irkutsk, Beijing and Ulaanbaatar for the summer and winter seasons of 2017–2018. The meteorological potential of the atmosphere (MPA) was used as the criterion for assessing the atmospheric self-purification. It is shown that in the summer season of 2017 the favorable meteorological conditions for the dispersion of air pollutants were dominant over the territory of Irkutsk and Ulaanbaatar. In the summer, MPA was 0,99 and 0,78 in Irkutsk and in Ulaanbaatar, respectively. MPA varied from 2,14 to 4,66 in Beijing in the summer. For the winter months in the three cities, MPA > 1, which indicates an accumulation of pollutants in the atmosphere for that season. In Ulaanbaatar there were unfavorable conditions for self-purification: the maximum MPA index (9.5) was observed in December. The largest contribution to impairment of the atmospheric diffusing capacity over Ulaanbaatar in the wintertime was made by wind velocities of 0–1 m/s. It was found that the maximum accumulation of pollutants in the atmosphere over Beijing occurs in the winter. MPA varied from 15,0 in February to 19,03 in December, averaging 16.68. Fogs made the largest contribution to the unfavorable meteorological conditions of Beijing in December–February. The characteristic properties of the atmospheric circulation, wind regime, fog and atmospheric precipitation were responsible for MPA of Irkutsk, Ulaanbaatar and Beijing for the period under consideration.*

*Keywords: meteorological potential of the atmosphere, unfavorable meteorological conditions, anticyclone, calm, fog, precipitation.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в мире большое внимание уделяется мониторингу состава атмосферы и контролю качества воздуха в городах. Актуальным стало изучение пространственно-временной изменчи-

ности потенциала рассеивания атмосферы в крупных промышленных центрах. Рост мегаполисов в конце XX—начале XXI в. вызвал усиление антропогенной нагрузки на города и окружающие их регионы. Высокий уровень атмосферного загрязнения в городах приводит к резкому повышению заболеваемости и преждевременной смертности населения [1]. Недавние исследования показали, что причиной многих заболеваний является негативное воздействие загрязненного воздуха [2]. Уровень загрязнения зависит от изменчивости объемов выбросов и метеорологических условий рассеивания примесей в атмосфере. Существует много характеристик и комплексных показателей, которые описывают влияние метеорологических условий на рассеивание загрязнений в приземном слое атмосферы [3–6]. Используя многолетние значения метеорологических элементов, можно рассчитать климатический потенциал самоочищения атмосферы. Некоторые особенности пространственной дифференциации способности атмосферы к самоочищению в Байкальском регионе представлены в работе [7].

До начала 1990-х гг. рассматривался потенциал загрязнения атмосферы, который учитывал климатические характеристики приземного воздуха и вертикальную стратификацию атмосферы [8]. В настоящее время сократились пункты и частота аэрологического зондирования атмосферы, поэтому нет возможности использовать информацию о вертикальном распределении температуры с необходимой дискретностью. Разрабатывались критерии оценки накопления загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на основе данных приземных метеорологических наблюдений [9]. Цель данного исследования — рассчитать метеорологический потенциал атмосферы (МПА) за летний и зимний сезоны в Иркутске, Пекине, Улан-Баторе и оценить возможность самоочищения атмосферы в указанных городах.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА

Иркутск ( $52^{\circ}17'$  с. ш.,  $104^{\circ}16'$  в. д.) расположен в азиатской части России, на южной окраине Иркутско-Черемховской равнины, на берегах р. Ангары, высота над уровнем моря — от 420 до 550 м. Иркутск включен в Приоритетный список городов России с очень высоким уровнем загрязнения воздуха (комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) равен или выше 14) [10]. Улан-Батор, столица Монголии ( $47^{\circ}54'$  с. ш.,  $106^{\circ}52'$  в. д.), находится в долине р. Туул, высота над уровнем моря — от 1300 до 1350 м. Улан-Батор относится к числу городов мира с наиболее запыленной атмосферой, что подтверждают эколого-химические исследования в последнее десятилетие [11, 12]. Пекин, столица Китайской Народной Республики ( $39^{\circ}54'$  с. ш.,  $116^{\circ}23'$  в. д., высота над уровнем моря — от 40 до 50 м), признан одним из самых загрязненных городов мира [13–15]. Все три города расположены в азиатской части Евразии, входят во второй естественный синоптический район и считаются экологически неблагополучными.

Метеорологические условия относятся к группе основных факторов, влияющих на рассеивание концентраций загрязняющих веществ в атмосфере. Достаточно сложно оценить связь между уровнем загрязнения атмосферного воздуха и отдельными метеорологическими величинами, поэтому для установления причин высокого уровня загрязнения атмосферы нужно в расчетах использовать их комплексные показатели, которые соответствуют метеорологическим условиям. Штиль, слабый ветер, туман, инверсии относятся к неблагоприятным метеорологическим условиям, способствующим накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. При неблагоприятных метеорологических условиях ухудшается качество атмосферного воздуха, происходит превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязнителей. Осадки и сильный ветер (со скоростью более 6 м/с) относятся к благоприятным метеорологическим условиям, которые уменьшают концентрации загрязняющих веществ, способствуют самоочищению атмосферного воздуха.

Метеорологический потенциал рассеивающей способности атмосферы рассчитывался за июнь—август 2017 г. и декабрь—февраль 2017–2018 гг. по методике, разработанной Т.С. Селегей [16]. Указанный метеорологический потенциал учитывает факторы, способствующие как загрязнению (числитель формулы), так и рассеиванию примесей в атмосфере (знаменатель). Повторяемость скорости ветра 0–1 м/с — один из основных метеорологических параметров, который содействует накоплению вредных примесей в приземном слое атмосферы. Туманы усиливают это накопление, а в некоторых случаях увеличивают токсичность примесей. Первый фактор, влияющий на рассеивание примесей, — повторяемость дней с сильным ветром ( $\geq 6$  м/с). При такой скорости ветра происходит вынос вредных примесей из очага загрязнения. Второй фактор — это осадки  $\geq 0,5$  мм в сутки, способствующие осаждению различных аэрозолей, что приводит к заметному очищению воздуха от примесей. Метеорологический потенциал атмосферы вычисляется по формуле

$$\text{МПА} = (\text{Pш} + \text{Pт}) / (\text{Po} + \text{Pв}),$$

где Pш — повторяемость скорости ветра 0–1 м/с; Pт — повторяемость дней с туманом; Po — повторяемость дней с осадками  $\geq 0,5$  мм; Pв — повторяемость скорости ветра  $\geq 6$  м/с, %.

Все параметры представленной формулы рассчитываются по данным наблюдений на метеорологических станциях. Повторяемость скорости ветра вычисляют следующим образом: число случаев со скоростью ветра 0–1 м/с за месяц делится на общее число случаев за этот месяц. Повторяемость дней с осадками  $\geq 0,5$  мм и туманом определяется как отношение числа дней с осадками и туманом к числу дней в месяце. Результаты выражаются в процентах. При МПА < 1 преобладают процессы, способствующие рассеиванию, при МПА > 1 происходит накопление примесей в атмосфере.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По указанной формуле был рассчитан МПА Иркутска, Улан-Батора и Пекина. Результаты расчетов приведены в таблице. За зимние месяцы во всех трех городах МПА > 1, что свидетельствует о накоплении примесей в атмосфере за этот сезон. В Иркутске МПА изменялся от 0,88 в декабре до 1,16 в январе. Повторяемость штилей (0–1 м/с), осадков ( $\geq 0,5$  мм/сут) и тумана за июнь–август и декабрь–февраль в Иркутске, Пекине и Улан-Баторе представлена на рис. 1. Январь и февраль в Иркутске характеризуются метеорологическими условиями, неблагоприятными для самоочистки атмосферы, а декабрь — благоприятными для рассеивания примесей. В Иркутске вклад числа дней с осадками в самоочистку атмосферы в декабре достиг 58 %, со штилем, ухудшающим рассеивающую способность атмосферы, в январе–феврале составил 39–32 % (см. рис. 1, а). В Пекине во все зимние месяцы сложились неблагоприятные условия для рассеивания примесей в атмосфере. МПА в декабре достиг максимального значения — 19,03. Самый большой вклад в ухудшение рассеивающей способности атмосферы в Пекине за декабрь–февраль внесли туманы — 48–50 % (см. рис. 1, б). В Улан-Баторе во все зимние месяцы также наблюдались неблагоприятные условия для самоочистки атмосферы. МПА изменялся от 9,5 в декабре до 7,0 в январе и феврале. Неблагоприятным метеорологическим условиям в городе способствовала высокая повторяемость скорости ветра 0–1 м/с (от 60 до 90 %) (см. рис. 1, в).

В летний сезон над Иркутском и Улан-Батором преобладали процессы, которые способствовали рассеиванию примесей в атмосфере. В Иркутске вклад числа дней с осадками за июнь–июль составил 23–32 % (см. рис. 1, а). Однако не все летние месяцы оказались благоприятными для самоочистки атмосферы в указанных городах. В августе МПА Иркутска составил 1,81. Вклад числа дней со скоростью ветра 0–1 м/с в этом месяце достиг 39 %. В Улан-Баторе в июле МПА был равен 1,66. Максимальный вклад в формирование высокого значения МПА внесли скорости ветра 0–1 м/с — 48 % (см. рис. 1, в). Благоприятные условия для самоочистки атмосферы в Улан-Баторе сложились в июне и августе (значение МПА равнялось 0,6 и 0,09 соответственно). Основной вклад в МПА внесли дни с осадками (см. рис. 1, в). В Пекине на протяжении летнего сезона МПА изменялся от 4,66 в июне до 2,14 в августе. В городе наблюдались неблагоприятные метеорологические условия, которые способствовали накоплению загрязняющих веществ в атмосфере. Вклад туманов в ухудшение самоочищающей способности атмосферы Пекина в июне–июле составил 93–96 % (см. рис. 1, б). Таким образом, летом 2017 г. в Иркутске и Улан-Баторе преобладали метеорологические условия, уменьшающие концентрации загрязняющих веществ в атмосфере. В Пекине как в летний сезон 2017 г., так и в зимний 2017–2018 г. сложились неблагоприятные метеорологические условия для рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере.

Загрязнение атмосферного воздуха чаще всего оценивают с помощью величины выбросов в атмосферу, рассчитывая их ПДК. При этом не учитывается синоптическая обстановка, на фоне которой

Средние месячные и сезонные значения МПА

Город	Месяц и сезон							
	XII	I	II	Зима	VI	VII	VIII	Лето
Иркутск	0,88	1,16	1,10	1,04	0,57	0,60	1,81	0,99
Пекин	19,03	16,02	15,00	16,68	4,66	4,28	2,14	3,69
Улан-Батор	9,50	7,00	7,00	7,83	0,60	1,66	0,09	0,78

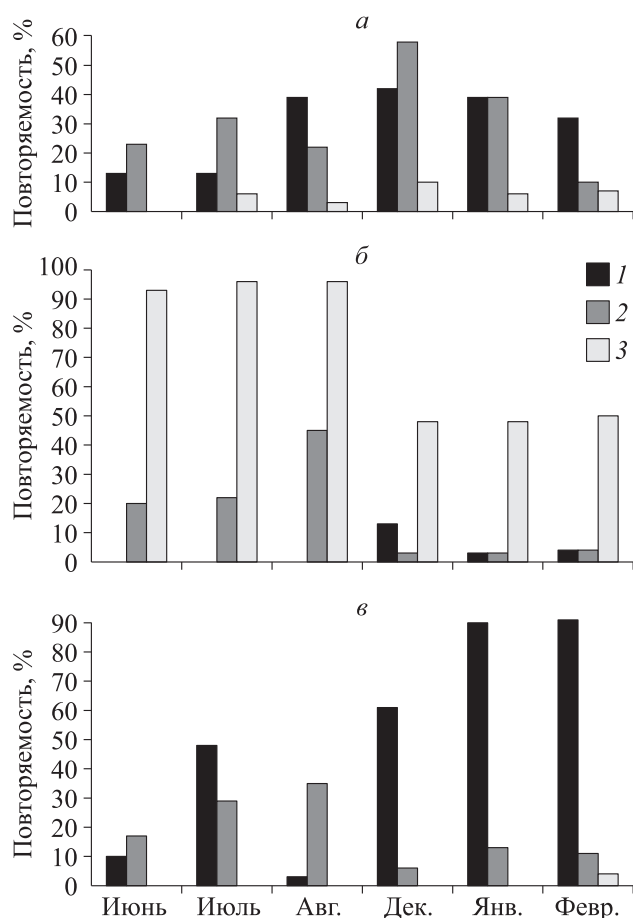


Рис. 1. Повторяемость штилей (1), осадков (2) и туманов (3) в Иркутске (а), Пекине (б), Улан-Баторе (в).

происходят эти выбросы. На накопление или рассеивание примесей влияют различные метеорологические условия. Синоптические ситуации, связанные с антициклоническими процессами, способствуют увеличению концентрации загрязняющих веществ. В зимний период циркуляция атмосферы над Иркутском, Улан-Батором и Пекином обусловлена воздействием Азиатского максимума и преобладанием антициклонических процессов. Азиатский антициклон (Монгольский, Сибирский) определяет погоду в указанных городах зимой. Наблюдается высокое атмосферное давление (рис. 2, б). В Иркутске атмосферное давление, приведенное к уровню моря, в исследуемый зимний период изменялось в пределах 759–792 мм рт. ст., в Пекине — 759–780, в Улан-Баторе — 765–794. Преобладали нисходящие движения воздуха, отсутствовали осадки, часто наблюдался штиль, препятствующий обменным процессам в приземном слое атмосферы. Сложилась неблагоприятная метеорологическая ситуация, загрязняющие вещества скапливались в приземном слое атмосферы городов. Мезоклиматический потенциал формирования качества воздуха в приземном слое атмосферы Иркутска оценивался как крайне низкий [17].

Средние месячные значения метеорологического потенциала самоочищения атмосферы в Иркутске, рассчитанные за период с 1966 по 2017 г., позволили сделать вывод о том, что только в апреле и мае наблюдаются благоприятные метеорологические условия для рассеивания примесей в атмосфере [18]. Используя балльно-оценочный подход, способность атмосферы Улан-Батора к самоочищению можно охарактеризовать как крайне низкую [19]. Снижение рассеивающей способности атмосферы Улан-Батора в зимний период обусловлено следующими факторами: горно-котловинным рельефом, Монгольским антициклоном, преимущественно угольным отоплением [20]. В зимние месяцы отмечалась самая низкая рассеивающая способность атмосферы во всех трех городах (МПА > 1). Исключение составил декабрь 2017 г. в Иркутске: МПА = 0,80, а это относительно благоприятные условия для рассеивания примесей. Декабрьская месячная многолетняя норма осадков в Иркутске равна 19 мм. За декабрь 2017 г. количество осадков в городе достигло 50 мм (263 % от месячной нормы). Таким образом, вклад дней с осадками в самоочищение атмосферы составил 58 %.

Летом происходит ослабление западно-восточного переноса. У поверхности земли преобладает барическое поле пониженного давления (см. рис. 2, а). В этот период в Улан-Баторе хорошо выражена горно-долинная циркуляция, которая приносит чистый воздух с гор. В августе усиливается циклоническая циркуляция, выпадает большое количество осадков. Самоочищающая способность атмосферы в городе за указанный месяц была максимальной. Очевидно, перечисленные факторы повлияли на МПА Улан-Батора в летние месяцы. На погоду в Пекине летом в основном влияет восточно-азиатский муссон. Известно, что синоптические ситуации, связанные с циклоническими процессами и быстрым переносом воздуха, способствуют увеличению рассеивающей способности атмосферы. Однако, несмотря на то что механизм летней муссонной циркуляции сопряжен с циклонами, в Пекине летом МПА > 1. Возможно, формированию высокого уровня загрязнения атмосферы способствует географическое положение города. С северной и западной стороны Пекин окружен горами Сишань и Яншань, и на территории города происходит застой воздушных масс. Угольная промышлен-

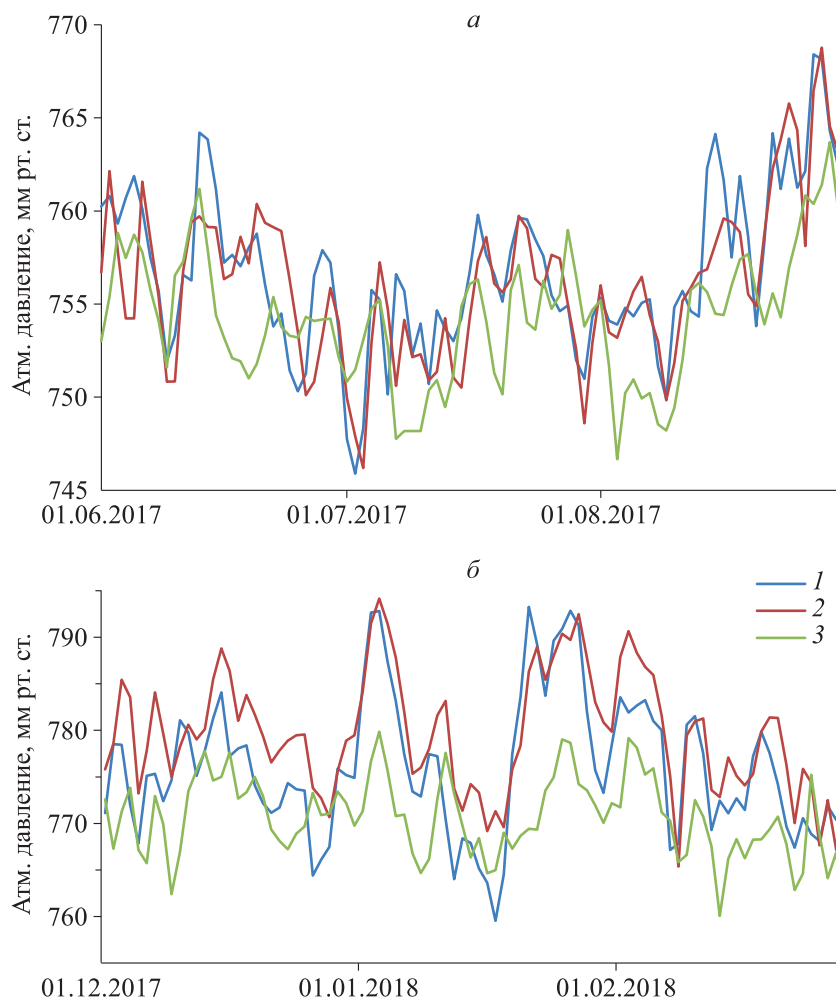


Рис. 2. Месячный ход атмосферного давления, приведенного к уровню моря, в Иркутске (1), Улан-Баторе (2) и Пекине (3) в июне–августе (а), декабре–феврале (б).

ленность и транспорт также значительно снижают рассеивающую способность атмосферы и вносят свой вклад в образование смога.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения метеорологического потенциала самоочищения атмосферы позволяет в оперативном режиме оценить меняющиеся климатические условия, которые определяют степень загрязнения атмосферного воздуха. На формирование метеорологического потенциала самоочищения атмосферы Иркутска, Улан-Батора и Пекина оказали влияние особенности атмосферной циркуляции, ветровой режим, туман и осадки. Атмосферные процессы летнего сезона 2017 г. способствовали рассеиванию примесей в Иркутске и Улан-Баторе. В зимний сезон 2017–2018 г. во всех трех городах МПА > 1. В Иркутске и Улан-Баторе высокое значение МПА объяснялось высокой повторяемостью ветра со скоростью 0–1 м/с. Неблагоприятные условия для самоочищения атмосферы за весь рассматриваемый период сложились в Пекине. Наибольший вклад в формирование таких условий внесли туманы. Для более полной характеристики рассеивающей способности атмосферы над исследуемыми городами планируется определить многолетние значения МПА и провести их корреляцию с загрязняющими веществами, вносящими наибольший вклад в уровень загрязнения, учитывая специфику промышленности в каждом из городов.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (0347–2016–003).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гичев Ю.П. Загрязнение окружающей среды и здоровье человека. — Новосибирск: Наука, 2002. — 229 с.
2. Ефимова Н.В. Медико-экологические проблемы: ретроспективный анализ на примере Иркутской области // Бюл. Вост.-Сиб. центра СО РАН. — 2013. — № 3–1 (91). — С. 57–61.
3. Sankaran S., Murugappan A., Kanakasabai V., Rajendran M. Meteorological potential for air pollutant dispersion in urban and rural areas along the east coast of Tamilnadu // Int. Journ. Engineering Science and Technology. — 2012. — Vol. 4, N 6. — P. 2552–2559.
4. Андреев С.С. Краткая оценка биоклиматических ресурсов ЮФО по индексу КМ (коэффициенту климатического потенциала самоочищения атмосферы) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Сер. Естеств. науки. РАН. — 2006. — № 5. — С. 93–97.
5. Переведенцев Ю.П., Хабутдинов Ю.Г. Метеорологический потенциал самоочищения и качество атмосферного воздуха в Казани в последние десятилетия // Вестн. Удмурт. ун-та. — 2012. — № 3. — С. 23–28.
6. Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н. О методике определения метеорологического потенциала загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 28, № 8 (319). — С. 725–729.
7. Корытный Л.М., Башалханова Л.Б., Веселова В.Н., Бальжинов А.В., Михеева Е.В., Башалханов И.А. Природно-климатические факторы экологической безопасности в контексте социально-экономического развития Байкальского региона // Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2018. — Т. 25. — С. 88–106.
8. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 184 с.
9. Селегей Т.С., Юрченко И.П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природ. ресурсы. — 1990. — № 2. — С. 132–137.
10. Список городов России с наибольшим уровнем загрязнения воздуха [Электронный ресурс]. — <http://voeikovmgo.ru/index.php?id=681&lang=ru> (дата обращения 20.05.2018).
11. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Сорокина О.И., Бажа С.Н., Гунин П.Д., Энх-Амгалан С. Эколого-геохимическое состояние почв г. Улан-Батор (Монголия) // Почвоведение. — 2011. — № 7. — С. 771–784.
12. Sorokina O.I., Enkh-Amgalan S. Lead in the landscapes of Ulaanbaatar city // Arid Ecosystems. — 2012. — Vol. 2, N 1. — P. 61–67.
13. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракитин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 8–19.
14. Yu M., Cai X., Xu C., Song Yu. A climatological study of air pollution potential in China // Theoretical and Applied Climatology. — 2018. — P. 1–12.
15. Lu C., Deng Q., Liu W., Huang B., Shi L. Characteristics of ventilation coefficient and its impact on urban air pollution // Journ. on Central South University. 2012. — Vol. 19. — P. 615–622.
16. Селегей Т.С. Метеорологический потенциал самоочищения атмосферы Сибирского экономического района // Труды Зап.-Сиб. регион. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-та. — М.: Гидрометеиздат, 1989. — Вып. 86. — С. 84–89.
17. Лиевич Н.Л., Сорокина Л.П. Климатический потенциал самоочищения атмосферы: опыт разномасштабной оценки // География и природ. ресурсы. — 1992. — № 4. — С. 160–165.
18. Аргучинцева А.В., Кочугова Е.А. Потенциал самоочищения атмосферы // Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2019. — Т. 27. — С. 3–15.
19. Экологический атлас бассейна озера Байкал / Отв. ред. А.Р. Батуев, Л.М. Корытный, Ж. Оюунгэрэл, Д. Энх-тайван. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — 145 с.
20. Аргучинцев В.К., Аргучинцева А.В., Ариунсанаа Б.-Э. Оценка загрязнения воздушной среды г. Улан-Батора автотранспортом // Изв. Иркут. ун-та Сер. Науки о Земле. — 2014. — Т. 8. — С. 15–24.

*Поступила в редакцию 24.01.2019*

*После доработки 20.05.2019*

*Принята к публикации 19.09.2019*