

УДК 550.41

**К ВОПРОСУ О КРИТЕРИИ ДАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА****Котова Е.И., Коробов В.Б.***ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова» Российской академии наук, Москва,  
e-mail: ecopp@yandex.ru*

Исследование антропогенного воздействия через атмосферу на окружающую среду различных районов является одним из самых актуальных в геоэкологии. В научной литературе имеется большое количество работ, посвященных оценке влияния дальнего атмосферного переноса на формирование химического состава компонентов окружающей среды. Наряду с этим у специалистов отсутствует согласованное представление о том, что следует считать дальним переносом. В данной статье рассматривается вопрос определения понятия «дальний перенос». Авторами предложен один из возможных подходов, где в качестве базиса предлагается использовать бассейновый принцип. В данном подходе для оценки уровня воздействия дальнего атмосферного переноса на территорию бассейна используется процент площади, подвергающейся воздействию удаленного источника. С использованием экспертных методов и метода теории нечетких множеств разработана вербально-числовая шкала оценки значимости воздействия дальнего переноса (в первом приближении). Для построения вербально-числовой шкалы использовались результаты опроса семи экспертов. При усреднении экспертных суждений использовались медианные значения. Данная шкала может быть применена для экспресс-оценки воздействия источника, что требуется на ранних стадиях экологической оценки территорий и прилегающих к ним морских акваторий при проектировании опасных объектов.

**Ключевые слова:** дальний перенос, площадь водосбора, нечёткие множества, экспертные методы, вербально-числовая шкала

**TO THE QUESTION OF THE LONG-RANGE TRANSFER CRITERIA****Kotova E.I., Korobov V.B.***P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, e-mail: ecopp@yandex.ru*

The study of anthropogenic impact through the atmosphere on the environment of various regions is one of the most relevant in geoecology. There is a large number of works in the scientific literature devoted to assessing the impact of long-range transfer on the formation of the chemical composition of environmental components. Along with this, there is no agreed upon idea of what should be considered long-range transfer. This article discusses the definition of the concept of "long-range transfer". The authors proposed one of the options, where it is proposed to use the basin approach as a basis. This approach uses a percentage of the area exposed to a remote source to estimate the impact of long-range atmospheric transport on the basin. The results of a survey of experts are presented. To build a verbal-numerical scale, the results of a survey of 7 experts were used. When averaging expert judgments, median values were used. This scale can be used for an express assessment of the impact of the source, which is required in the early stages of environmental assessment of territories and adjacent marine waters during the design of hazardous facilities.

**Keywords:** long-range transport, catchment area, fuzzy calculations, expert methods, verbal-numerical scale

Исследование антропогенного воздействия через атмосферу на окружающую среду различных районов является одним из самых актуальных направлений в геоэкологии. Ему посвящено довольно большое число отдельных публикаций и обзоров (например, [1–3] и другие работы из списка литературы). Системные исследования переноса и осаждения вещества в различных геосферах, в том числе через атмосферу, проводятся в течение более чем пятидесяти лет под общим руководством академика А.П. Лисицына в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) [2–4].

Но, несмотря на большое количество исследований, затрагивающих тему атмосферного переноса, до сих пор нет утвержденного и даже взаимно согласованного научным сообществом понятия «дальнего переноса».

Цель данной работы – рассмотреть вопрос дефиниции понятия «дальний перенос» и выработать альтернативный подход к его определению.

**Материалы и методы исследования**

Авторами проведен обзор научных работ, в которых проводились исследования дальнего переноса.

В рамках предложенного в работе подхода для ответа на вопрос, какой процент площади водосбора достаточен, чтобы влияние дальнего переноса можно было бы считать значимым, использовались экспертные методы и методы теории нечетких множеств. С помощью данных методов была построена вербально-числовая шкала для оценки значимости атмосферного переноса [5].

Для построения вербально-числовой шкалы нами использовались результаты

опроса семи экспертов, из них четыре доктора наук, два кандидата наук. При усреднении экспертных суждений использовались медианные значения экспертных оценок. Темы научных работ и характер работы экспертов непосредственно связаны с рассматриваемым вопросом.

### Результаты исследования и их обсуждение

В научной литературе можно найти различное множество подходов к определению понятия «дальний перенос». Так, в [6] указано, что дальний перенос загрязнений – это распространение загрязнений на *значительные* расстояния. Но что конкретно можно считать значительным расстоянием? В качестве примера дальнего переноса в этой же работе приведен дымовой шлейф города промышленного региона, который тянется на 200 км и более. Согласно данному примеру получается, что 199 км – это уже не дальний перенос. Также возникает вопрос о границе шлейфа, которая не является четкой и трудно определима.

В то же время в томе II монографии «Система Белого моря» [3, с. 48] в процессе исследования вклада аэрозолей в формирование природной среды Арктики дальними источниками считаются те, которые удалены на расстояние более 1 000 км.

В отдельных статьях, например [7], дальний перенос рассматривается не только для воздушной среды, но и для водных систем, но критерий, что считать дальним переносом, также отсутствует, а речь идет и о 700–800 км, и о 5000 км.

Часть авторов говорят о дальнем переносе загрязняющих веществ в том случае, если рядом нет источника загрязнения. Чаще всего данный принцип используется для северных, фоновых территорий, а также для заповедных территорий [8, 9].

Одним из подходов определения численных характеристик дальнего переноса является использование временного критерия. Учитывая, что в северной полярной области перенос атмосферных аэрозолей на расстояния до 10 000 км возможен в течение 5–10 суток, то при анализе атмосферного переноса, в том числе дальнего, чаще всего рассматривают пятисуточные траектории движения воздушных масс [10], в некоторых случаях авторы рассчитывают суточные траектории [9].

Отметим, что проблема установления числовых критериев разграничения непре-

рывных характеристик является общей для науки и решается, как правило, путём применения экспертных технологий, поскольку для таких случаев общих методологий не разработано [11].

Ещё одной из причин отсутствия единого мнения о том, что такое дальний перенос, может являться то обстоятельство, что выделить перенос загрязнения от конкретного источника в данную точку (участок) очень сложно. Можно лишь говорить об общем поступлении примесей на подстилающую поверхность в результате совокупного атмосферного переноса из разных направлений и от источников, расположенных на различных расстояниях. В связи с этим часть авторов в своих исследованиях не дают каких-либо критериев дальности переноса, а говорят в целом об атмосферном переносе примесей в исследуемому участку [12, 13].

По мнению авторов, одним из возможных подходов к определению дальнего переноса в Арктику может стать использование бассейнового принципа: если источник расположен на территории другого водосборного бассейна крупной реки, а загрязнение поступает на территорию водосборного бассейна рассматриваемой крупной реки, то можно говорить о дальнем переносе.

Чем обусловлен такой подход? В его основу положено разделение территории естественными природными границами, которыми являются водоразделы. Кроме того, загрязняющие вещества рано или поздно со стоком (чаще всего талых вод) поступают в водоток, а далее трансформируются и накапливаются в морях и океанах, в данном случае в Северном Ледовитом океане. При этом вдольбереговыми течениями и льдами загрязнение может распространяться не только на другие акватории, но и на берега. Причём приливами и нагонами загрязнённые воды могут распространяться и вверх по течению морских устьев других рек, непосредственно впадающих в это же море, проникая на десятки и даже сотни километров.

Проиллюстрируем это на таком примере. Пусть на одном из нефтяных месторождений, расположенном в бассейне р. Печора, произошло возгорание нефтехранилища. Допустим также, что сложилась такая синоптическая ситуация, что продукты возгорания непосредственно осаждались на поверхность Печоры и её притоков. И так было в течение нескольких дней, пока аварийная ситуация не была ликвидирована.

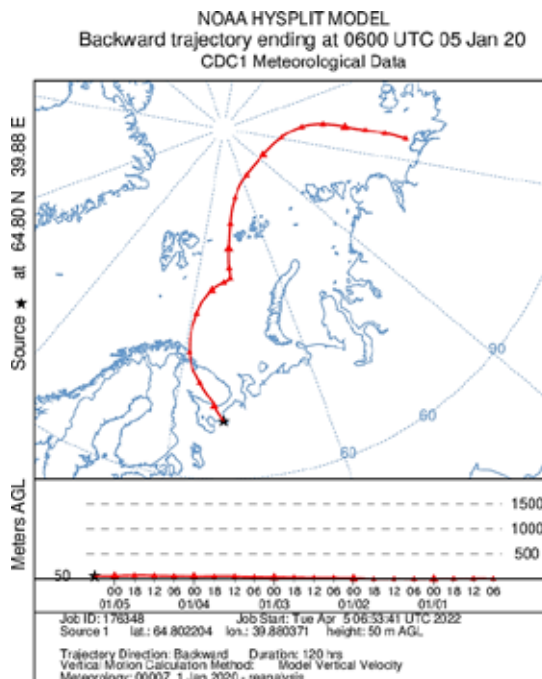
С речными водами эти и образовавшиеся в результате реакции с водой загрязняющие вещества попадают в Печорскую губу Баренцева моря и стоковым течением переносятся на восток вдоль морского берега. Если в это время здесь сложится такая синоптическая ситуация, в результате которой возникнет штормовой нагон, да ещё такой, что его пик совпадёт с максимальным приливом, то загрязнённые воды попадут в устьевые участки рек, впадающих в Печорскую губу на этом участке побережья. Но это ещё не всё. В Арктике многие берега низкие и сильно заболочены. Во время нагонов они затопляются морскими водами. Если вода содержит в себе загрязняющие вещества, то они, по крайней мере часть из них, могут остаться в болотах, а также озёрах, попавших в зону затопления.

Площади водосбора именно крупных рек выбраны нами по той причине, что их величина определяется однозначно по водотокам данной реки и рельефу, в то время как для средних и особенно для малых рек это можно сделать не всегда.

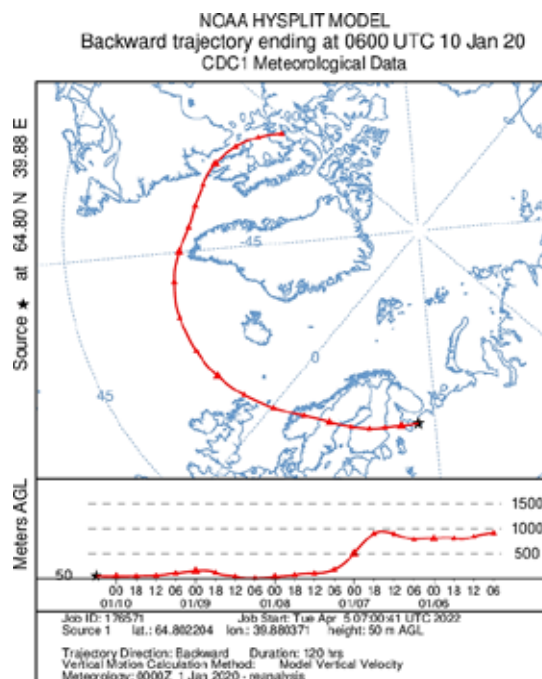
Другим учитываемым нами обстоятельством стало то, что водосборы крупных рек образуют непрерывное поле: граница одного водного бассейна является одновременно границей и другого бассейна. Важным обстоятельством является и то, что границы водоразделов – чёткие, что позволяет получить точные значения площадей [14].

Крупные водосборы позволяют рассматривать загрязнение от источников выбросов как единый процесс для всей экосистемы: выброс – осаждение – смыв – сток в море (океан). Получается, что если источник водосбора расположен на территории другого водосбора, то его вполне можно квалифицировать как дальний. Однако при этом не следует забывать, что загрязнение будет распространяться и дальше как по воздуху, так и по воде и может охватывать очень большие территории и акватории, включая морские.

Вопрос же о расстоянии между источником и точкой расчёта/измерения при таком подходе будет неоднозначным. Атмосферный перенос определяется синоптическими условиями, которые отличаются большим разнообразием. В циклонах, антициклонах, при наличии атмосферных инверсий траектории между одними и теми же точками будут различными, а значит, и путь поллютантов будет разным (рисунок).



a)



б)

*Обратные пятисуточные траектории  
при различных синоптических ситуациях  
(построены авторами на [15])*

Следовательно, при оценке величины загрязнения также следует учитывать интенсивность выброса, протяжённость траектории, скорость ветра, а также направление распространения. Так, кратковременный,

но мощный выброс может оказать значительно большее воздействие на природную среду, чем долговременный и менее мощный, особенно если учитывать количество поступающих в данную точку загрязняющих веществ. В ряде случаев возможен суммарный эффект воздействия и тогда даже те источники, чей вклад в загрязнение незначителен, в сумме могут приводить к повышенным концентрациям на отдаленных территориях. К тому же чем дальше аэрозоли находятся в атмосфере, тем большее их количество рассеивается и осаждается на поверхность.

Поэтому невозможно однозначно установить в качестве дальнего переноса критерия дальности величину расстояния как таковую. Следовательно, расстояние между точкой выброса и точкой измерения (расчёта) каждый раз будет разным даже при близких атмосферных условиях.

Таким образом, при определении дальнего переноса, исходя из бассейнового принципа, критерий дальности будет переменной величиной и представляет собой функцию от траектории поллютанта в воздухе.

В то же время не все реки, находящиеся в пределах одного водосбора, могут входить в систему большой реки. Они вполне могут впадать – и в Арктике многие из них впадают – непосредственно в море. С учётом приливных, стонно-нагонных и вдольбереговых течений распространение загрязнения от них по морской акватории может быть достаточно большим. Это обстоятельство подтверждает преимущество бассейнового подхода, позволяя учитывать большее число процессов, благоприятствующих распространению загрязнения.

Бассейновый подход меняет саму сущность понятия «дальний перенос». Речь теперь идёт не о линейных расстояниях от источников или протяженности траектории (они могут быть небольшими, если источник расположен рядом за соседним водоразделом), а о площади, подвергшейся воздействию, причём не только напрямую, но и опосредованному путём переноса вдольбереговыми морскими течениями и штормовыми нагонами. А она может быть достаточно большой, если загрязнение по водотоку разносится на большие расстояния. Такое происходит, когда загрязняющие вещества попадают в средние и большие реки ближе к истоку или в среднем течении.

В связи с этим необходимо оценить не только всю площадь водосбора, но и ка-

кой процент площади, на которую оказано воздействие, достаточен, чтобы влияние дальнего переноса можно было бы считать значимым.

Для этого с помощью экспертных методов и методов теории нечетких множеств нами была построена вербально-числовая шкала. Такие шкалы удобнее всего составлять в виде таблицы.

Результаты обработки суждений экспертов представлены в таблице.

Шкала оценки значимости  
дальнего переноса

№	Значимость воздействия	Площадь загрязнения, %
1	2	3
1	Незначительное	0–10
2	Слабое	11–25
3	Умеренное	26–50
4	Сильное	51–75
5	Очень сильное	76–100

### Заключение

Обзор литературы показал, что понятие «дальний перенос» трактуется исключительно как удалённость источника воздействия от места загрязнения. При этом нет единого мнения относительно расстояния между точками выброса и осадения, которое у разных авторов отличается в несколько раз, что не позволяет однозначно интерпретировать процессы загрязнения окружающей среды.

В качестве альтернативы авторами предложен бассейновый принцип, позволяющий учесть распространение загрязнения по всей площади водосбора. Такой подход даёт возможность также учесть загрязнение водных объектов посредством переноса загрязнённых морских вод течениями в устьевые области рек, впадающих в море и протекающих на этих же водосборах.

Для оценки значимости воздействия при дальнем переносе авторами разработана вербально-числовая шкала. Полученная шкала является наиболее простой. Её можно усовершенствовать, если принять в расчёт процессы разбавления поллютантов в речных водах. Тогда будет иметь значение и место осадения на поверхность водосбора загрязняющих веществ из атмосферы. Важным фактором уровня воздействия является и мощность источника, но она косвенно учитывается в площади,

на которую оказано воздействие. Следует также учитывать и другие факторы, такие как возможность вторичного загрязнения речных вод со стороны моря во время приливов и нагонов, интенсивность накопления загрязнителей на земной поверхности, класс их опасности и т.д. Здесь может быть несколько подходов, которые авторы планируют исследовать в дальнейшем.

Данная же шкала может использоваться для экспресс-оценки воздействия источника, что требуется на ранних стадиях экологической оценки территорий и прилегающих к ним морских акваторий при проектировании опасных объектов.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания № FMWE-2021-0016 «Взаимодействие биосфер в Мировом океане».*

#### Список литературы

1. Ilyin I., Rozovskaya O., Travnikov O., Varygina M., Aas W. Heavy Metals: Transboundary Pollution of the Environment. EMEP Status Report 2/2014. MSC-E&CCC, 2014. URL: [http://www.msceast.org/reports/2\\_2014.pdf](http://www.msceast.org/reports/2_2014.pdf) (date of access: 13.02.2022).
2. Starodymova D.P., Shevchenko V.P., Sivonen V.P., Sivonen V.V. Material and elemental composition of surface aerosols on the north-western coast of the Kandalaksha Bay of the White Sea. Atmospheric and Oceanic Optics. 2016. Vol. 29. No 6. P. 507–511. DOI: 10.1134/S1024856016060154.
3. Шевченко В.П., Голобокова Л.П., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Кабанов Д.М., Новигатский А.Н., Панченко М.В., Политова Н.В., Полькин В.В., Поповичева О.Б., Ходжер Т.В. Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Баренцевым морем // Система Баренцева моря. М.: ООО Издательство «ГЕОС», 2021. С. 127–142. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(11).
4. Котова Е.И., Шевченко В.П. Влияние дальнего атмосферного переноса на формирование ионного состава атмосферных осадков и снежного покрова прибрежной зоны западного сектора российской Арктики // Фундаментальные исследования. 2014. № 12–11. С. 2378–2382.
5. Коробов В.Б. Построение вербально-числовых шкал методом нечетких множеств для оценки состояния природных объектов // Проблемы региональной экологии. 2005. № 5. С. 18–23.
6. Протасов В.Ф., Матвеев А.С. Экология: Термины и понятия. Стандарты, сертификация. Нормативы и показатели: учеб. и справ. пособие. М.: Финансы и статистика, 2001. 204 с.
7. Vakulovskiy S.M., Germenchuk M.G., Zhukova O.M. Long-range radionuclide transport in the atmosphere and water bodies. Russian Meteorology and Hydrology. 2011. Vol. 36. No 4. P. 265–268. DOI: 10.3103/S1068373911040078.
8. Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A., Kuzmin M.I. The effect of long-range atmospheric transport of organochlorine compounds by soil studies from Mongolia to the Arctic. Doklady Earth Sciences. 2016. Vol. 466. No 2. P. 169–172. DOI: 10.1134/S1028334X16020148.
9. Василевич М.И., Симакин Л.В. Особенности формирования химического состава снежного покрова на территории Печоро-Ильчского биосферного заповедника // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 5. С. 48–56.
10. Vinogradova A.A., Kotova E.I., Topchaya V.Y. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia. Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38. No. 1. P. 78–85. DOI: 10.1134/S1875372817010103.
11. Коробов В.Б. Теория и практика экспертных методов. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. 281 с. DOI: 10.12737/monography\_5caee0067f1835.43206494.
12. Ilin I.S. Modeling a long-range transport of mercury and its compounds over Europe. Russian Meteorology and Hydrology. 2002. No. 2. P. 31–37.
13. Макоско А.А., Матешева А.В. Оценки тенденций дальнего загрязнения атмосферы регионов российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4 (28). С. 59–71. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-59-71.
14. Korytny L.M. The basin concept: From hydrology to nature management. Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38. No. 2. P. 111–121. DOI: 10.1134/S1875372817020019.
15. Air Resources Laboratory. NOAA. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arl.noaa.gov/> (дата обращения: 15.07.2022).