

УДК 581.527.44+546.11.027\*3+543.27

## Применение лишайников для мониторинга загрязнения атмосферы тритием

А. В. Голубев, В. Н. Голубева,  
Т. А. Кошелева, В. Ф. Кузнецова,  
С. В. Маврин, А. Ю. Алейников,  
А. В. Стеньгач, А. Ю. Кораблева

*Представлены результаты исследований по использованию лишайников для количественной оценки атмосферного загрязнения тритием. Исследования проводились на протяжении 30 мес в естественных условиях. Использовались две экспериментальные площадки: вблизи источника загрязнения и на удалении. Образцы воздуха и лишайников отбирались ежемесячно. В лишайниках измеряли тритий в свободной влаге (НТО) и органически связанный тритий (ОСТ). Показано, что активность трития в образцах лишайников вблизи источника загрязнения выше, чем на удалении. Определена зависимость от активности НТО, ОСТ в лишайниках и активности трития в атмосферной влаге.*

### Введение

Применение эпифитных лишайников для биомониторинга атмосферы основано на способности лишайников аккумулировать элементы из окружающей среды [1]. Показано, что лишайники получают питательные вещества для роста и метаболизма из мокрых и сухих осадков [2, 3, 4], которые проникают в слоевища лишайников преимущественно в форме катионов и анионов из растворов, находящихся в окружающей среде [3, 5]. Поверхность лишайника представляет собой мицелий гриба и клетки водоросли [6]. В отличие от высших растений эта поверхность не имеет хорошо развитой кутикулы и устьичного аппарата, которые выполняют роль защитно-регуляторного барьера, способного контролировать процессы газо- и водообмена с внешней средой. Поэтому слоевище лишайника открыто 24 ч в сутки в течение десятков лет для элементов, находящихся в атмосфере. Кроме того, величина открытой сорбционной поверхности лишайника в 20–100 раз больше, чем у высших растений и трав, что обусловлено строением лишайника [7]. Поэтому лишайники быстро впитывают большие количества раствора, содержащего минеральные соединения, и столь же быстро отдают поглощенную воду при высыхании, накапливая в своем талломе растворенные в ней вещества. Все это приводит к тому, что лишайники способны накапливать в загрязненных районах элементы в количествах, значительно превышающих их физиологические потребности и в значительно больших количествах, чем высшие растения и травы [8]. Существует значительное количество исследований по использованию лишайников для качественной оценки загрязнения атмосферы тяжелыми металлами, радионуклидами, оксидами серы, азота и др. [9]. Однако проблема использования лишайников для оценки загрязнения окружающей среды тритием изучена недостаточно. Существуют публикации по изучению способности лишайников окислять атмосферный молекулярный тритий [10]. Показано, что окисление трития лишайником происходит в 100–1000 раз быстрее, чем иглами сосны и составляет от 3 до 10 % в час. Авторы делают заключение о перспективности использования лишайников для мониторинга



га окружающей среды, в частности для определения пути продвижения "облака" элементарного трития. Ранее нами было показано [11], что вблизи источника загрязнения содержание в лишайниках трития в свободной влаге растений (ТСВ) и органически связанного трития (ОСТ) выше, чем на удалении от него. Причем, содержание ТСВ в лишайнике близко к содержанию НТО в атмосферной влаге, а содержание ОСТ в лишайнике значительно выше. Сделано предположение, что содержание ТСВ в лишайнике связано с содержанием трития в атмосфере в момент отбора проб, в то время как содержание ОСТ определяется присутствием трития в атмосфере за длительный период времени.

Чтобы использовать лишайники для количественной оценки загрязнения атмосферы, необходимо установить корреляционные зависимости между содержанием трития в лишайниках и его содержанием в атмосфере.

### **Постановка эксперимента**

Исследования проводились в центральном регионе России. В зоне исследований имеется постоянно действующий источник выброса трития, период действия – более 40 лет. Были выбраны две экспериментальные площадки, одна – вблизи источника выброса трития, другая – на расстоянии примерно 30 км в противоположном направлении по отношению к преобладающему направлению ветра. Площадки были условно названы "загрязненная" и "чистая". Размер площадок – примерно 100 × 100 м. Преобладающий вид растительности на площадках – смешанный лес. Основные виды деревьев – сосна, береза, осина, липа, ель. На каждой площадке были установлены стационарные посты отбора проб воздуха на содержание трития. В качестве биоиндикатора использовался эпифитный лишайник *Hypogimnia physodes*.

Отбор проб лишайников осуществлялся один раз в месяц. Пробы лишайников отбирались со стволов деревьев на высоте около 1,5 м от поверхности земли по всей длине окружности. Отбор проб проводился равномерно со всей экспериментальной площадки. В лишайниках определялось содержание ТСВ и ОСТ. Выделение ТСВ проводили методом термовакuumной десорбции при температуре + 100 °С [11]. Выделение ОСТ из сухого остатка образца лишайника проводили на той же установке, используя для окисления органической материи до структурной воды и оксида углерода метод пиролитического разложения в присутствии оксида ванадия (V) при температуре + 500 °С.

Отбор проб воздуха проводился путем непрерывной прокачки атмосферного воздуха через поглотитель паров воды [11]. В качестве сорбента использовался синтетический цеолит марки NaA. Окисление НТ до НТО происходило на платиновом катализаторе, нанесенном на оксид алюминия. Измерение содержания трития в пробах воздуха проводилось один раз в месяц. Влагу из цеолита выделяли методом термовакuumной десорбции при температуре + 300 °С.

Содержание трития в воде, полученной из образцов лишайника и цеолита, измеряли методом жидкостной сцинтилляционной радиометрии.

Эксперименты проводились на протяжении 30 мес.

### **Результаты и обсуждение**

Результаты измерения содержания ТСВ и ОСТ в лишайниках и трития во влаге воздуха для "чистой" и "загрязненной" площадок представлены на рис. 1–3. Усредненные за весь период наблюдений значения даны в табл. 1. Полученные результаты показали, что содержание НТО во влаге атмосферы и в лишайниках не превышает предельно допустимого значения содержания трития в воде, которое составляет  $4 \cdot 10^{-6}$  Ки/л.

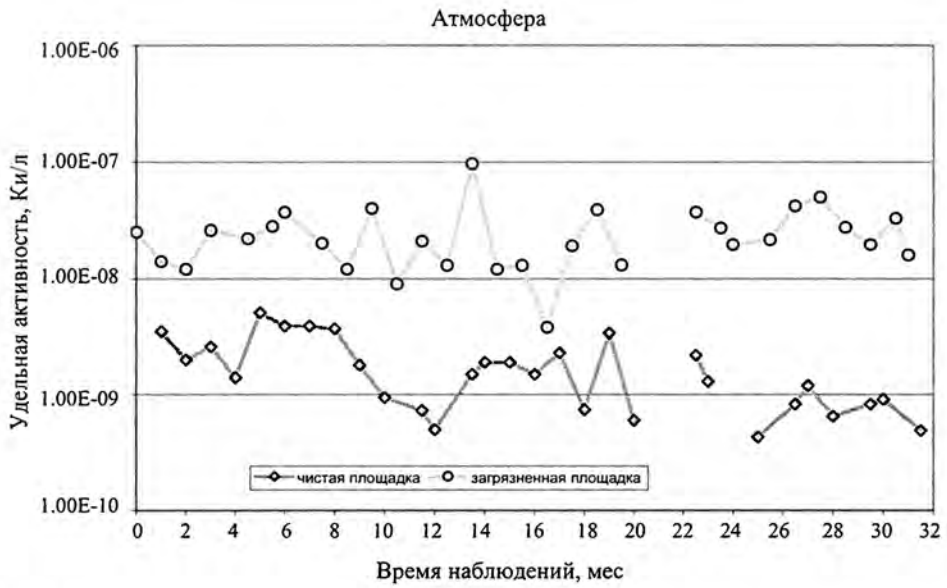


Рис. 1. Удельная активность трития во влаге воздуха чистой и загрязненной площадок

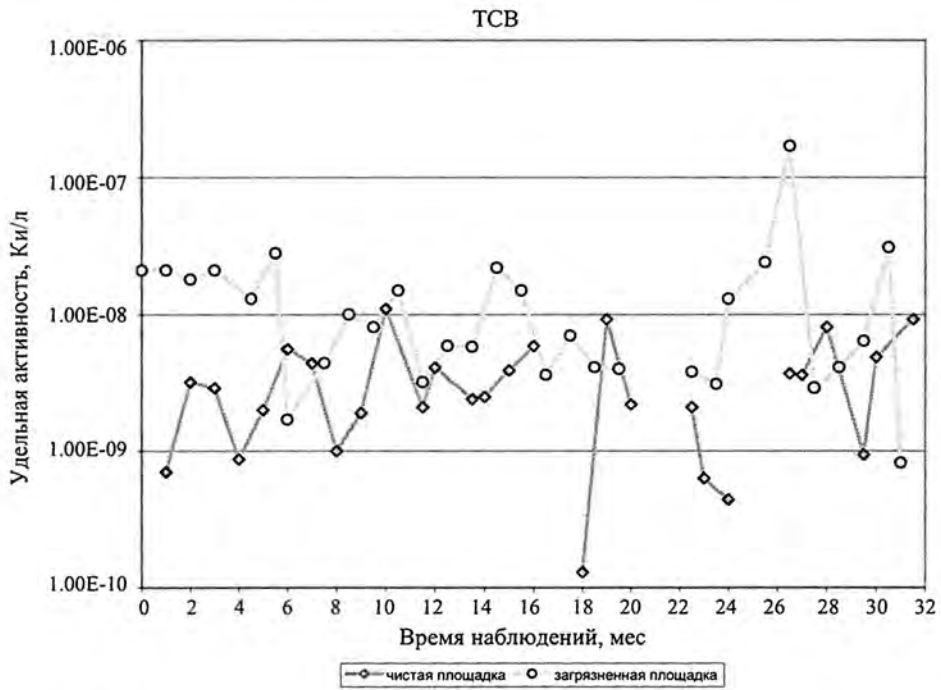


Рис. 2. Удельная активность ТСВ лишайников из чистой и загрязненной площадок



# ПРИМЕНЕНИЕ ЛИШАЙНИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ТРИТИЕМ

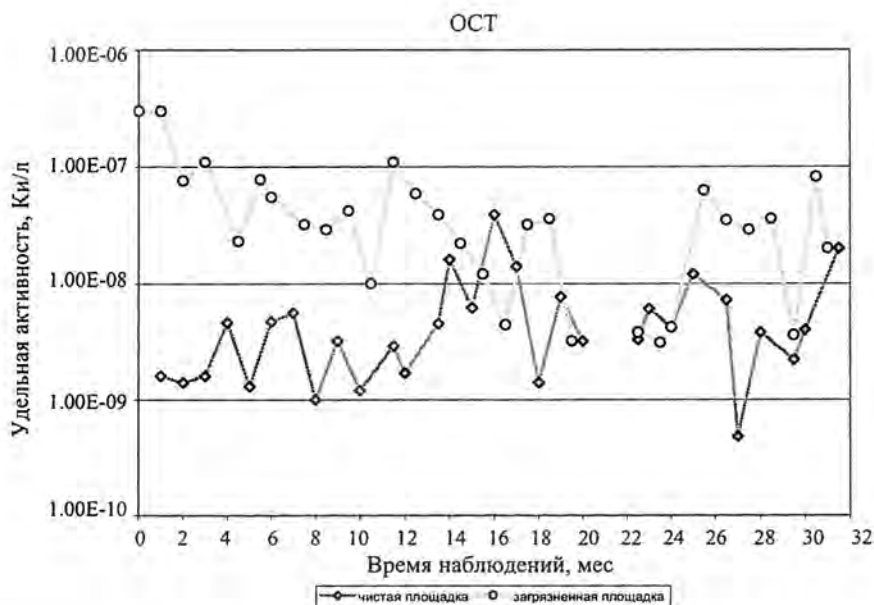


Рис. 3. Удельная активность ОСТ лишайников из чистой и загрязненной площадок

Таблица 1

Усредненное содержание трития в воздухе и лишайниках для чистой и загрязненной площадок

Определяемый параметр	Содержание трития, Ки/л	
	Чистая площадка	Загрязненная площадка
НТО в воздухе	1.81E-09	2.56E-08
ТСВ в лишайнике	3.38E-09	1.62E-08
ОСТ в лишайнике	6.30E-09	4.66E-08

Первичная статистическая обработка данных измерений показала, что выборки в большинстве случаев не соответствуют критериям нормальности, что препятствует применению традиционного *t*-критерия. Поэтому при анализе значимости различия в содержании трития в лишайниках и в атмосфере для чистой и загрязненной площадок использовались известные непараметрические критерии различия между независимыми группами: критерий Вальда – Вольфовица, *U*-критерий Манна – Уитни и двухвыборочный критерий Колмогорова – Смирнова. Все критерии показали наличие статистически значимого различия в содержании трития в воздухе и лишайниках, отобранных из чистой и загрязненной площадок.

На основании экспериментальных данных, полученных за весь период наблюдений 30 мес и за 22 мес, построены зависимости содержания ТСВ и ОСТ в лишайниках от содержания трития во влаге атмосферы и определен доверительный интервал для линии регрессии, рис. 4, 5. Доверительный интервал определялся при  $P = 0,95$  для линии регрессии, полученной за весь период наблюдений. Зависимости, построенные для 30 мес наблюдений, имеют вид:

для ТСВ лишайника

$$C_{\text{воздух}} \approx 10^{-3,0831} C_{\text{ТСВ}}^{0,6183} \approx 8,2585 \cdot 10^{-4} C_{\text{ТСВ}}^{0,6183}, \quad (1)$$

для ОСТ лишайника

$$C_{\text{воздух}} \approx 10^{-3,092} C_{\text{ОСТ}}^{0,6455} \approx 8,091 \cdot 10^{-4} C_{\text{ОСТ}}^{0,6455}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{воздух}}$  – содержание трития во влаге воздуха, Ки/л (Бк/л);  $C_{\text{ТСВ}}$  – содержание ТСВ лишайника, Ки/л (Бк/л);  $C_{\text{ОСТ}}$  – содержание ОСТ в лишайнике, Ки/л (Бк/л).

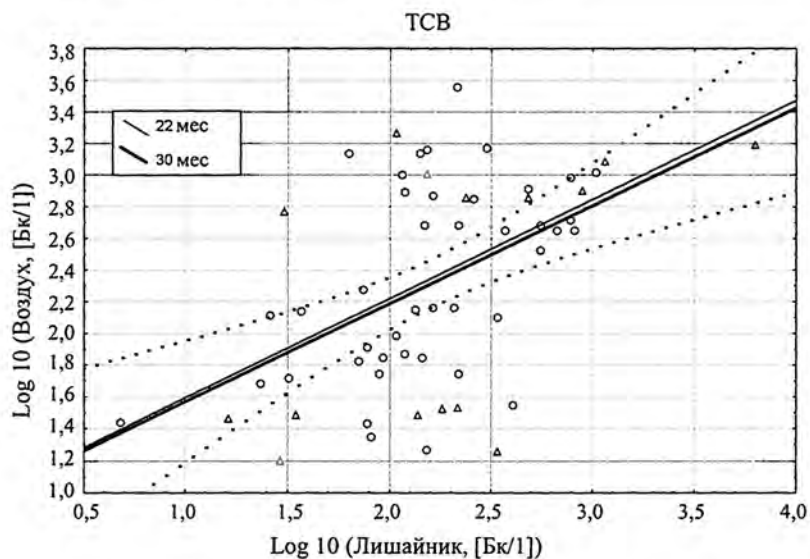


Рис. 4. Регрессионная зависимость между содержанием трития во влаге воздуха и ТСВ лишайника

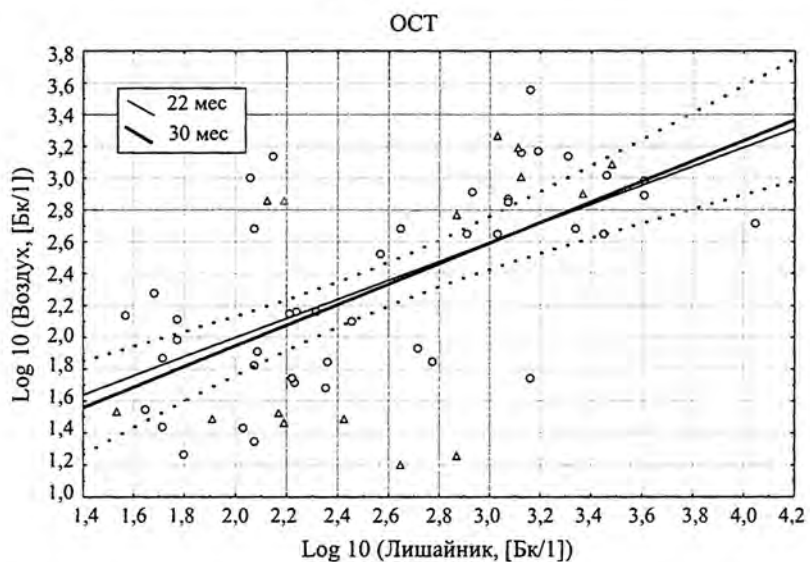


Рис. 5. Регрессионная зависимость между содержанием трития во влаге воздуха и ОСТ лишайника



## ПРИМЕНЕНИЕ ЛИШАЙНИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ТРИТИЕМ

Изучена возможность использования метода лишеноиндикации для мониторинга загрязнения атмосферы тритием. Для этого использовались регрессионные зависимости для 22 мес, рис. 4, 5. При проверке методики использовались данные, полученные в следующие 8 мес. Для измеренных в этот период значений содержания ТСВ и ОСТ в лишайниках с помощью регрессионной зависимости определяли содержание НТО в атмосфере. Полученные значения сравнивались со значениями, измеренными пробоотборными станциями. Сравнение значений приведено в табл. 2, 3.

Таблица 2

Сравнение результатов определения трития методом лишеноиндикации (для ТСВ)  
и при помощи пробоотборных станций

Содержание трития в воздухе (Ки/л)		Различия между пробоотборной станцией и методом лишеноиндикации		
Пробоотборная станция	Метод лишеноиндикации	в абсолютных единицах (Ки/л)	в относительных единицах (> или < в <i>n</i> раз)*	
Загрязненная площадка	1.95E-08	1.20E-08	7.50E-09	> 1.63
	2.15E-08	1.76E-08	3.90E-09	> 1.22
	4.20E-08	6.00E-08	-1.80E-08	< 1.43
	5.00E-08	4.68E-09	4.53E-08	> 10.7
	2.75E-08	5.82E-09	2.17E-08	> 4.73
	1.95E-08	7.69E-09	1.18E-08	> 2.54
	3.30E-08	2.07E-08	1.23E-08	> 1.59
	1.59E-08	2.12E-09	1.38E-08	> 7.50
Чистая площадка	4.30E-10	2.07E-09	-1.64E-09	< 4.81
	8.30E-10	5.46E-09	-4.63E-09	< 6.58
	1.20E-09	5.36E-09	-4.16E-09	< 4.47
	6.50E-10	8.91E-09	-8.26E-09	< 13.7
	8.30E-10	2.31E-09	-1.48E-09	< 2.78
	9.10E-10	6.51E-09	-5.60E-09	< 7.15
	4.90E-10	9.65E-09	-9.16E-09	< 19.6

\* "> (<) *n*" обозначает, что пробоотборной станцией измерили значение в *n* раз больше (меньше), чем показал метод лишеноиндикации.

Сравнение результатов определения трития методом лишеноиндикации и при помощи пробоотборных станций (для ОСТ)

Содержание трития в воздухе (Ки/л)		Различия между пробоотборной станцией и методом лишеноиндикации		
Пробоотборная станция	Метод лишеноиндикации	в абсолютных единицах (Ки/л)	в относительных единицах (> или < в л раз)	
Загрязненная площадка	1.95E-08	3.50E-09	1.60E-08	> 5.57
	2.15E-08	1.76E-08	3.85E-09	> 1.22
	4.20E-08	1.24E-08	2.96E-08	> 3.39
	5.00E-08	1.11E-08	3.89E-08	> 4.50
	2.75E-08	1.26E-08	1.49E-08	> 2.18
	1.95E-08	3.19E-09	1.63E-08	> 6.11
	3.30E-08	2.07E-08	1.23E-08	> 1.59
	1.59E-08	8.89E-09	7.01E-09	> 1.79
Чистая площадка	8.30E-10	4.83E-09	-4.00E-09	< 5.82
	9.25E-10	1.42E-09	-4.92E-10	< 1.54
	8.30E-10	2.38E-09	-1.55E-09	< 2.87
	9.10E-10	3.40E-09	-2.49E-09	< 3.74
	4.90E-10	8.89E-09	-8.40E-09	< 18.1

Результаты, полученные двумя методами, в большинстве случаев различаются в 1,5–8 раз для ТСВ и в 1,5–6 раз для ОСТ. Исключения составляют измерения, когда различие для ТСВ – 10,7–19,6 раз, для ОСТ – 18,1 раз (выделены маркером в табл. 2, 3). Интересно отметить несколько тенденций.

- Метод лишеноиндикации как по ТСВ (в большинстве случаев), так и по ОСТ, дает заниженные содержания трития в воздухе для загрязненной площадки и завышенные – для чистой площадки.

- Для загрязненной площадки различия между результатами пробоотборной станции и методом лишеноиндикации меньше в случае использования ТСВ.

- Для чистой площадки наблюдается обратная тенденция, различия между результатами пробоотборной станции и методом лишеноиндикации меньше в случае использования ОСТ.

Вероятно, это связано с биологическими процессами в лишайниках, связанными с поглощением и распределением влаги, содержащей тритий.

В целом, при определении трития в воздухе метод лишеноиндикации дает хорошие результаты. Метод может быть использован для диагностики загрязнения атмосферы тритием и выявления источника загрязнения.

### Список литературы

1. Brown D. H., Beckett R. P. The role of the cell wall in the intracellular uptake of cations by lichens // Lichen physiology and cell biology. New York, London: Plenum Press, 1985. P. 247–258.



2. Nash III T. H., Egan R. S. The biology of lichens and bryophytes // In: Nash III T. H., Wirth V. (Ed.) Lichens, Bryophytes and Air Quality. – Berlin: Bibliotheca Lichenologica 30, 1988. P. 11–22.
3. Nash III T. H. Nutrients, elemental accumulation and mineral cycling // Lichen biology. Ed. by T. H. Nash III. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. P. 136–153.
4. Rodrigo. A. et al. Trace metal content in *Parmelia caperata* (L.) Ach. compared to bulk deposition, through fall and leaf-wash fluxes in two holm oak forests in Montseny (NE Spain) // The Science of the total Environment. 1999. Vol. 33. P. 359–367.
5. Kershaw K. A. Physiological ecology of lichens. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1985. Vol. 293.
6. Голлербах М. М. Жизнь растений. Т. 3. Водоросли и лишайники. М.: Просвещение, 1977.
7. Рамзаев П. В. Ионизирующие излучения биосферы и их биологическая индикация в антропоэкологии // Материалы 2-го Всесоюзного совещания по космической антропоэкологии. Л.: АН СССР. 1984. С. 81–85.
8. Loppi S., Nelli L., Ancora S., Bargagli R. Accumulation of trace elements in the peripheral and central parts of foliose lichen // Bryologist. 1997. Vol. 100, N 2. P. 251–253.
9. Conti M. E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution Rev. 1, U.S. Department of Energy, Lawrence Livermore National Laboratory, 1, 2000./ assessment – a review // Environmental Pollution. 2001. Vol. 114. P. 471–492.
10. Ichimasa M., Ichimasa Y., Yagi Y., Kou R., Suzuki M., Akita Y. Oxidation of atmospheric molecular tritium in plant leaves, lichens and mosses // Radiat. Res. 1989. Vol. 30. P. 323–329.
11. Golubev A. V., Belovodsky L. F., Golubeva V. N., Kosheleva T. A., Kuznetsova V. F., Mavrin S. V., Surano K., Hoppes W. Application of lichens for assessment of atmospheric pollution by tritium // Fusion Science and Technology. 2002. Vol. 41. P. 409–412.

### **Lichens as Applied for Monitoring of Atmospheric Pollution by Tritium**

A. V. Golubev, V. N. Golubeva, T. A. Kosheleva, V. F. Kuznetsova, S. V. Mavrin,  
A. Yu. Aleinikov, A. V. Sten'gach, A. Yu. Korableva

*The paper presents the results of studies related to implementation of lichens for quantitative estimation of the rate of atmospheric pollution by tritium. The studies in the natural environment evolved through the 30-month period. Two experimental sites were involved: one located in the vicinity of the polluting source, another – at some remote point. Air and lichens were sampled on a monthly base. Tritium in tissue free water (TFWT) and the one organically bound (OBT) were measured in the lichens. The activity of tritium in lichens, located in the vicinity of contaminating source was demonstrated to be higher than that of the lichens located distantly. TFWT/OBT in lichens versus tritium activity in the atmospheric moisture was identified.*