

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.45

doi: 10.17223/19988591/23/13

Е.А. Головацкая, Л.Г. Никонова (Абзалимова)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск)

### РАЗЛОЖЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ

Приведены экспериментальные данные по разложению растений-торфообразователей в торфяных почвах олиготрофного типа. Дана количественная оценка скорости разложения основных видов-торфообразователей, выноса углерода, азота и зольных элементов из растительных остатков в процессе разложения. Выявлено, что наиболее интенсивные процессы разложения протекают на начальном этапе разложения, затем скорость разложения снижается. Наиболее устойчивы к разложению сфагновые мхи, за исключением *Sph. angustifolium*. Наименее устойчивы – травянистые растения *Menyanthes trifoliata*, *Rubus chamaemorus*. Кустарнички характеризуются средней скоростью разложения. Динамика выноса углерода из растительных остатков растений-торфообразователей повторяет динамику потери массы органического вещества при деструкции. В процессе разложения растительных остатков в течение первого года наблюдается иммобилизация азота во многих видах исследуемых растений. Показано, что количество запасаемого в процессе фотосинтеза углерода значительно превышает потери углерода при разложении растительных остатков как для отдельных видов растений, так и для фитоценоза в целом.

**Ключевые слова:** болотные фитоценозы; растения-торфообразователи; скорость деструкции; потери углерода; продукция.

### Введение

Изучение процессов трансформации органического вещества приобретает большое значение в связи с изменением климата и возрастанием уровня антропогенного воздействия на природные экосистемы. Знание количественных характеристик круговорота элементов в болотных экосистемах необходимо для изучения механизмов их устойчивости и продуктивности, обоснования прогноза эволюции болот в связи с изменением экологической обстановки. В болотных экосистемах происходит постоянный обмен минеральными элементами между растениями и торфяной почвой. Темпы разложения растительных остатков и высвобождения из них элементов питания зависят от индивидуальных особенностей химического состава растений и условий, в которых эти процессы протекают. Болотные экосистемы характеризуются более низкими, по сравнению с продуктивностью, скоростями

трансформации органического вещества растений, за счет чего и происходит постоянное накопление органического вещества в виде торфа [1].

Цель работы – оценка скорости торфонакопления и количества углерода, запасаемого в виде торфа в результате разложения растительных остатков на олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири.

### Материалы и методики исследования

Исследования проводились на территории восточной части Обь-Иртышского междуречья, в пределах восточной окраины Васюганского плато – ключевой участок (КУ) «Бакcharский» (Бакcharский район Томской области). Среднегодовая температура воздуха  $0,51^{\circ}\text{C}$ , годовая сумма осадков 515 мм (по данным метеостанции «Бакchar»). А также на территории Обь-Томского междуречья – ключевой участок «Томский» (Томский район Томской области). По данным метеостанции «Томск» среднегодовая температура воздуха  $1,2^{\circ}\text{C}$ , годовая сумма осадков 604 мм. Расстояние между ключевыми участками составляет 180 км. Бакcharское болото КУ «Бакcharский» находится в нативном состоянии, т.е. не подвержено антропогенному воздействию. Болото Кирсановское на территории КУ «Томский» также не испытывает прямого антропогенного воздействия, однако находится в зоне действия Томского водозабора [2]. Характеристика растительного покрова, мощность торфяной залежи и среднемноголетние уровни болотных вод (УБВ) исследуемых фитоценозов представлены в табл. 1, подробное описание исследуемых сообществ приведено в [3]. Измерение УБВ проводилось непосредственно в каждом исследуемом фитоценозе в соответствии с [4]. Скорость разложения растительных остатков определялась для 3 видов сфагновых мхов, 5 видов кустарничков, 5 видов трав. Для определения интенсивности деструкции растительных остатков применялся метод закладки растительности в торф [5]. В августе–сентябре 2008 г. на болоте были собраны растения, характерные для сосново-кустарничково-сфагновых фитоценозов и осоково-сфагновой топи (всего 13 видов, табл. 2). У вечнозеленых кустарничков для эксперимента брали прошлогодние листья, у трав – ветошь, у сфагновых мхов использовали очес. Исследуемые растения разделяются на 3 группы по видовому и химическому составу (табл. 2). Растительный материал был высушен в лабораторных условиях и развешен в нейлоновые мешочки (масса навески 3–6 г), которые закладывали в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности в конце вегетационного периода (сентябрь 2008 г.). Повторность опыта – 3-кратная. Образцы извлекались в сентябре 2009, 2010 гг. (через 1 и 2 года). Растительные образцы были заложены в торфяные залежи исследуемых болотных экосистем: сосново-кустарничково-сфагновых фитоценозов – высокого и низкого рья (ВР и НР) и осоково-сфагновой топи (ОТ) Бакcharского болота; рья и осоковой топи Кирсановского болота (КР и КТ) (табл. 2). Верхние горизонты торфяных залежей Бакcharского болота сложены сфагновыми

торфами с низкой степенью разложения (0–10%) – магелланикум-, фускум- и ангустифолиум-торфом на высоком, низком ряме и осоково-сфагнуовой топи соответственно. Торф верхних горизонтов Кирсановского болота представлен на ряме ангустифолиум-торфом (степень разложения 15–20%), на осоковой топи – осоково-сфагновым торфом (степень разложения 20%).

Т а б л и ц а 1

## Растительный покров исследуемых болотных фитоценозов

| Деревья                                                                                                | Кустарнички                                                                                                                                        | Травы                                                                                                                         | Мхи                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Бакcharское болото</b>                                                                              |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| <b>Сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз – высокий рям (ВР)</b>                                    |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| Мощность торфяной залежи 100 см, (УБВ (см) средний: –19, макс.: +3, мин.: –44)                         |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| <i>Pinus silvestris</i><br><i>L. Pinus sibirica</i><br>Mayr.<br><i>Betula pubescens</i> Ehrh.<br>(90%) | <i>Ledum palustre</i> L.<br><i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench<br><i>Vaccinium vitis-idea</i> L.<br><i>Vaccinium oxycoccus</i> L.<br>(90%) | <i>Carex globularis</i> L.<br><i>Eriophorum vaginatum</i> L.<br><i>Rubus chamaemorus</i> L.<br>(15%)                          | <i>Sphagnum angustifolium</i> (Russ. Ex Russ.) C. Jens<br>(96%)                                                    |
| <b>Сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз – низкий рям (НР)</b>                                     |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| Мощность торфяной залежи 200 см, (УБВ (см) средний: –5, макс.: +0,5, мин.: –13)                        |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| <i>P. silvestris</i> f.<br><i>Litwinowii</i><br>(30%)                                                  | <i>L. palustre</i><br><i>C. calyculata</i><br><i>Andromeda polifolia</i> L.<br><i>Vaccinium uliginosum</i> L.<br>(65%)                             | <i>E. vaginatum</i><br><i>R. chamaemorus</i><br><i>Drosera rotundifolia</i> L.<br>(5%)                                        | <i>Sphagnum fuscum</i> (Schmp.) Klinggr.<br><i>S. angustifolium</i><br><i>Sphagnum magellanicum</i> Brid.<br>(95%) |
| <b>Открытая осоково-сфагновая топь (ОТ)</b>                                                            |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| Мощность торфяной залежи 300 см, (УБВ (см) средний: –5, макс.: +0,2, мин.: –10)                        |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| –                                                                                                      | <i>V. oxycoccus</i><br><i>C. calyculata</i><br><i>A. polifolia</i><br>(20%)                                                                        | <i>E. vaginatum</i><br><i>Carex rostrata</i> Stokes.<br><i>Carex limosa</i> L.<br><i>Scheuchzeria palustris</i> L.<br>(50%)   | <i>S. fuscum</i><br><i>S. angustifolium</i><br><i>S. magellanicum</i><br>(100%)                                    |
| <b>Кирсановское болото</b>                                                                             |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| <b>Сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз – рям (КР)</b>                                            |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| Мощность торфяной залежи 310 см, (УБВ (см) средний: –39, макс.: –38, мин.: –40)                        |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| <i>P. silvestris</i><br>(90%)                                                                          | <i>L. palustre</i><br><i>C. calyculata</i><br><i>V. vitis-idea</i><br><i>V. oxycoccus</i><br>(90%)                                                 | <i>E. vaginatum</i><br><i>R. chamaemorus</i><br>(15%)                                                                         | <i>S. fuscum</i><br><i>S. angustifolium</i><br><i>S. magellanicum</i><br>(96%)                                     |
| <b>Осоковая топь (КТ)</b>                                                                              |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| Мощность торфяной залежи 110 см, (УБВ (см) средний: –8, макс.: –5, мин.: –11)                          |                                                                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                    |
| –                                                                                                      | <i>A. polifolia</i><br>(30%)                                                                                                                       | <i>E. vaginatum</i><br><i>C. rostrata</i><br><i>C. limosa</i><br><i>S. palustris</i><br><i>Menyanthes trifoliata</i><br>(50%) | <i>Sphagnum fallax</i> Klinggr.<br>(30%)                                                                           |

В исходных образцах и после эксперимента по разложению определяли убыль массы растительного вещества весовым методом, а также изменение зольности, содержания углерода и азота по общепринятым методикам [6, 7]. Скорость разложения рассчитывалась как процент потери массы через 12 и 24 месяцев по следующей формуле:

$$\text{Скорость разложения (\%)} = ((W_0 - W_1) / W_0) \times 100,$$

где  $W_0$  – вес исходного образца;  $W_1$  – вес образца через 1 и 2 года.

В каждом образце до и после разложения определяли содержание углерода, азота, зольность и рассчитывали потери углерода, азота и зольных элементов как процент от исходного содержания:

$$\text{Потери элемента (\%)} = ((X_0 W_0 - X_1 W_1) / X_0 W_0) \times 100,$$

где  $X_0$  – исходное содержание элемента, мг/г;  $X_1$  – содержание элемента через 1 и 2 года.

Т а б л и ц а 2

**Виды исследуемых растений-торфообразователей, место закладки эксперимента, исходный химический состав растительных образцов**

| Вид растения            | Место закладки | C, %  | N, % | C/N | A, % |
|-------------------------|----------------|-------|------|-----|------|
| Сфагновые мхи           |                |       |      |     |      |
| <i>S. angustifolium</i> | БР, КР         | 39,75 | 1,04 | 38  | 2,25 |
| <i>S. magellanicum</i>  | ОТ, КР         | 40,60 | 0,58 | 70  | 2,95 |
| <i>S. fuscum</i>        | НР, КР         | 39,33 | 0,46 | 86  | 1,09 |
| Кустарнички             |                |       |      |     |      |
| <i>A. polifolia</i>     | НР, КТ         | 49,47 | 1,15 | 43  | 2,62 |
| <i>L. palustre</i>      | НР, КР         | 50,33 | 1,27 | 40  | 2,61 |
| <i>V. vitis-idea</i>    | БР, КР         | 49,06 | 1,04 | 47  | 2,40 |
| <i>C. calyculata</i>    | НР, КР         | 50,33 | 1,38 | 37  | 2,53 |
| <i>V. oxycoccus</i>     | ОТ             | 47,37 | 1,04 | 46  | 3,25 |
| Травы                   |                |       |      |     |      |
| <i>M. trifoliata</i>    | ОТ, КТ         | 43,14 | 2,30 | 19  | 6,51 |
| <i>R. chamaemorus</i>   | НР, КР         | 41,87 | 1,38 | 30  | 4,01 |
| <i>C. rostrata</i>      | ОТ, КТ         | 41,87 | 1,15 | 36  | 3,63 |
| <i>E. vaginatum</i>     | ОТ, КТ         | 45,25 | 1,04 | 44  | 2,29 |
| <i>S. palustris</i>     | ОТ, КТ         | 43,98 | 1,15 | 38  | 4,32 |

Примечание. C – содержание углерода; N – содержание азота; C/N – отношение углерода к азоту; A – зольность.

## Результаты исследования и обсуждение

В среднем сфагновые мхи (рис. 1) характеризуются низкой скоростью разложения (за исключением *S. angustifolium* в торфяной залежи ряма Кирсановского болота – 60%), потери массы за два года составляют от 6 (*S. fuscum*, Бакчарское болото) до 32% (*S. angustifolium*, Бакчарское болото). Для всех исследуемых видов сфагновых мхов характерно менее интенсивное разложение в более влажных и прохладных условиях Бакчарского болота. Для всех исследуемых видов максимальная скорость разложения наблюда-

лась в первый год эксперимента, кроме *S. fuscum* на Кирсановском болоте, для которого максимальная интенсивность разложения достигается во второй год эксперимента.

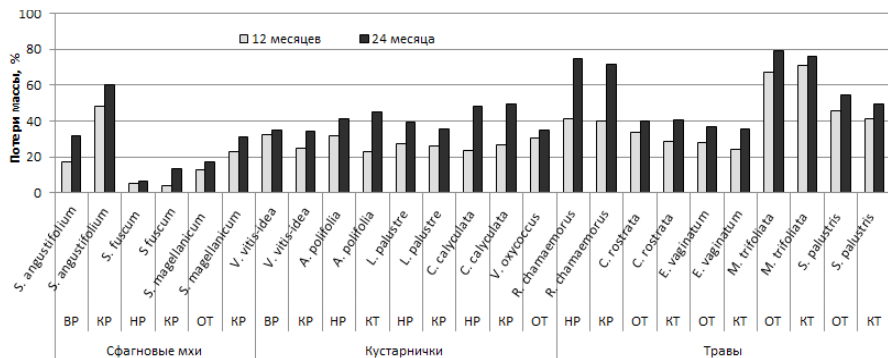


Рис. 1. Потери массы при разложении растений-торфообразователей

Средняя скорость разложения листьев кустарничков – 43% за два года. Одни и те же виды кустарничков в разных условиях имеют близкие величины скорости разложения и сходную динамику в течение двух лет (рис. 1). Максимальные потери массы были получены для листьев *C. calyculata* (48 и 49% на Бакчарском и Кирсановском болотах соответственно), минимальные – для *V. vitis-idea* (35 и 34% на Бакчарском и Кирсановском болотах соответственно). Различия по месту закладки образцов (Бакчарское или Кирсановское болото) слабо выражены, но на первом этапе разложение интенсивнее идет в условиях более влажного Бакчарского болота.

Потери массы трав при разложении характеризуются сходной динамикой для одинаковых видов, при этом более интенсивно теряется органическое вещество в условиях Бакчарского болота по сравнению с Кирсановским. Максимальные потери за два года получены для *M. trifoliata* (76–79%) и *R. chamaemorus* (71–74%), минимальные – для *E. vaginatum* (35–36%) (см. рис. 1).

В исследуемых образцах определялись потери углерода, азота, зольных элементов (табл. 3). Потери углерода в сфагновых мхах составляют от 3% от исходного содержания (*S. fuscum*, Бакчарское болото) до 27% (*S. magellanicum* Кирсановского болота и *S. angustifolium* Бакчарского болота). Для *S. angustifolium* на Кирсановском болоте получены максимальные потери углерода (56%).

Потери углерода при разложении исследуемых кустарничков в течение одного года составляют в среднем 27%, изменяясь от 35% (*A. polifolia* на НР Бакчарского болота) до 22% (*C. calyculata* на Бакчарском болоте) (табл. 3). Почти для всех кустарничков характерны быстрые потери углерода в

течение первых 12 месяцев и снижение потерь почти до нуля к концу второго года. Для *C. calyculata* на обоих участках характерны равномерные потери углерода в течение двух лет. Для *A. polifolia* на Кирсановском болоте характерно резкое увеличение потерь углерода к концу второго года.

Таблица 3

**Изменение содержания элементов при разложении растительных остатков растений-торфообразователей, % от исходного содержания**

| Группа        | Вид                     | Фитоценоз | Углерод |        | Азот  |        | Зольность |        |
|---------------|-------------------------|-----------|---------|--------|-------|--------|-----------|--------|
|               |                         |           | 1 год   | 2 года | 1 год | 2 года | 1 год     | 2 года |
| Сфагновые мхи | <i>S. angustifolium</i> | ВР        | 79      | 72     | 53    | 44     | 86        | 87     |
|               |                         | КР        | 47      | 44     | 65    | 44     | 49        | 48     |
|               | <i>S. fuscum</i>        | НР        | 97      | 97     | 187   | 69     | 114       | 79     |
|               |                         | КР        | 97      | 95     | 163   | 85     | 135       | 145    |
|               | <i>S. magellanicum</i>  | ОТ        | 90      | 87     | 84    | 129    | 88        | –      |
|               |                         | КР        | 77      | 73     | 103   | 53     | 45        | –      |
| Кустарнички   | <i>V. vitis-idea</i>    | ВР        | 71      | 70     | 80    | 69     | 45        | 45     |
|               |                         | КР        | 72      | 69     | 137   | 19     | 90        | 104    |
|               | <i>A. polifolia</i>     | НР        | 65      | 63     | 106   | 51     | 49        | 50     |
|               |                         | КТ        | 76      | 58     | 113   | 59     | 60        | 40     |
|               | <i>L. palustre</i>      | НР        | 75      | 67     | 115   | 54     | 45        | 13     |
|               |                         | КР        | 70      | 67     | 123   | 103    | 56        | 55     |
|               | <i>C. calyculata</i>    | НР        | 78      | 55     | 148   | 59     | 153       | 20     |
|               |                         | КР        | 73      | 51     | 95    | 90     | 73        | 54     |
| Травы         | <i>V. oxycoccus</i>     | ОТ        | 72      | 71     | 83    | 105    | 31        | 62     |
|               | <i>R. chamaemorus</i>   | НР        | 60      | 30     | 114   | 49     | 62        | 27     |
|               |                         | КР        | 58      | 32     | 117   | 53     | 35        | 23     |
|               | <i>C. rostrata</i>      | ОТ        | 70      | 68     | 52    | 47     | 59        | 55     |
|               |                         | КТ        | 76      | 67     | 84    | 69     | 87        | 45     |
|               | <i>E. vaginatum</i>     | ОТ        | 71      | 63     | 77    | 55     | 60        | 80     |
|               |                         | КТ        | 73      | 69     | 97    | 69     | 92        | 77     |
|               | <i>M. trifoliata</i>    | ОТ        | 35      | 25     | 97    | 26     | 15        | 13     |
|               |                         | КТ        | 29      | 28     | 57    | 39     | 27        | 12     |
|               | <i>S. palustris</i>     | ОТ        | 57      | 53     | 53    | 44     | 18        | 13     |
|               |                         | КТ        | 60      | 59     | 75    | 49     | 38        | 15     |

Примечание. ВР, НР, ОТ – высокий рям, низкий рям, осоково-сфагновая топь Бакcharского болота; КР, КТ – рям и осоково-сфагновая топь Кирсановского болота.

Максимальная скорость выноса углерода из растительных остатков травянистых растений характерна в течение первого года для всех видов. Средние потери углерода в травянистых растениях составляют 43% через год и 53% через два года.

В процессе разложения растительных остатков может происходить как минерализация азота, так и его иммобилизация (накопление). Согласно данным Л.С. Козловской с соавт. [5], по мере разложения сфагновых мхов повышается содержание азота мхов с 0,5 до 1,9; в дальнейшем в растениях, подвергающихся значительной минерализации, содержание азота начинает убывать,

а в случае гумусообразования количество азота остается высоким. В нашем исследовании содержание азота увеличилось в образцах *S. fuscum* и *S. magellanicum* (табл. 3). Максимальное увеличение содержания азота относительно исходного содержания составило 187% для *S. fuscum* на Бакчарском болоте.

При разложении листьев кустарничков почти во всех видах наблюдается иммобилизация азота к концу первого года разложения, за исключением *V. vitis-idea* на высоком рьяе, *V. oxycoccus* на открытой топи и *C. calyculata* на рьяе Кирсановского болота (табл. 3). Максимальное накопление азота происходит в образцах *C. calyculata* на Бакчарском болоте. К концу второго года происходит вынос азота, который в среднем для листьев кустарничков составляет 39% от исходного содержания азота. Наибольшие потери азота при разложении получены для листьев *V. vitis-idea* на Кирсановском болоте (82%).

При разложении травянистых растений иммобилизация азота наблюдается только у *R. chamaemorus* в течение 12 месяцев (см. табл. 3). У остальных видов выявлено снижение содержания азота, однако возможно временное увеличение его содержания на разных этапах разложения, но не превышающее исходное количество азота. Согласно литературным данным [8], существует определенный минимум азота, при котором идет интенсивное разложение органического вещества растений, – 1,5–1,7%, при более низком содержании азота скорость деструкции растительных остатков снижается. Содержание азота в исследуемых травянистых растениях 1,04–2,3%. Самое низкое содержание азота у *E. vaginatum* (1,04%), и, соответственно, самая низкая среди исследуемых травянистых растений скорость разложения.

Изменение соотношения C/N в растительных остатках в результате разложения свидетельствует о неравнозначных потерях углерода и азота. При увеличении отношения C/N относительные потери азота выше, чем потери углерода. Кроме того, при значительной иммобилизации азота также может снижаться значение соотношения C/N (рис. 2). К концу второго года эксперимента практически во всех сфагновых мхах наблюдается значительное увеличение отношения C/N, по сравнению с исходными образцами, за исключением *S. magellanicum* на Бакчарском болоте, где наблюдалась значительная иммобилизация азота, и *S. angustifolium* на Кирсановском болоте, где, по сравнению с остальными сфагновыми мхами, наблюдается интенсивный вынос углерода.

Динамика изменения отношения C/N в листьях кустарничков представлена на рис. 2. Травянистые растения характеризуются самым низким отношением C/N, по сравнению с кустарничками и сфагновыми мхами. В образцах *C. rostrata*, *E. vaginatum* и *S. palustris* увеличение соотношения C/N свидетельствует о более слабом разложении, по сравнению с остальными исследуемыми растениями, где происходит снижение отношения (рис. 2).

Оценка изменения содержания зольных элементов в сфагновых мхах при разложении показала, что на начальном этапе разложения происходит снижение зольности (за исключением *S. fuscum*); максимальным снижением

содержания зольных элементов характеризуется *S. magellanicum* на Кирсановском болоте, за первый год потери зольных элементов составили более 50% от исходного содержания (см. табл. 3).

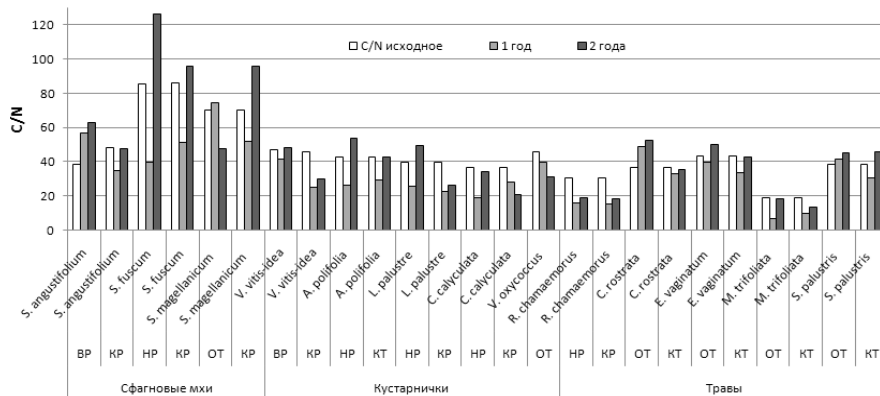


Рис. 2. Изменение отношения C/N при разложении растительных остатков растений-торфообразователей

К концу второго года эксперимента содержание зольных элементов начинает снижаться, в среднем потери зольных элементов составляют для сфагновых мхов около 30%, за исключением *S. fuscum* на Кирсановском болоте, для которого содержание зольных элементов по-прежнему выше (в 1,5 раза), чем в исходном состоянии. При этом все максимальные значения зольности растительных остатков не превышают зольности торфа, в котором находятся разлагающиеся образцы (табл. 4). Увеличение зольности в процессе разложения растительных остатков показано Н.Н. Бамбаловым с соавт. [9]. Согласно данным [5], в растительных остатках при разложении происходят снижение содержания калия и фосфора и увеличение содержания кальция и магния. На накопление кальция в опаде и затем в подстилке также указывали Д.Ф. Соколов и Е.Ф. Иваницкая [10], Н.И. Базилевич и А.А. Титлянова [11] и др.

В первый год происходит снижение содержания зольных элементов в растительных остатках кустарничков в среднем на 40% (см. табл. 3). Максимальным снижением зольности характеризуется *V. oxycoccus* на открытой топи Бакcharского болота, минимальным – *V. vitis-idea* на ряме Кирсановского болота. Следует отметить увеличение зольности (в 1,5 раза) в образцах *C. calyculata* на Бакcharском болоте. К концу второго года эксперимента содержание зольных элементов снизилось во всех образцах, за исключением *V. vitis-idea* на Кирсановском болоте. Максимальное снижение зольности наблюдается в листьях кустарничков, разлагающихся в более влажных и холодных условиях Бакcharского болота.

Т а б л и ц а 4

**Максимальная зольность при разложении сфагновых мхов  
на Бакcharском болоте и зольность торфа в слое 0–20 см**

| Растение | Зольность, %                           |                                |                                         |
|----------|----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
|          | Высокий рям<br><i>S. angustifolium</i> | Низкий рям<br><i>S. fuscum</i> | Открытая топь<br><i>S. magellanicum</i> |
| Торф     | 5,8                                    | 4,5                            | 4,0                                     |
| Мох      | 2,9                                    | 2,9                            | 3,0                                     |

По содержанию зольных элементов травянистые растения являются самыми высокозольными из исследуемых. Потери зольных элементов относительно исходного содержания также самые высокие среди исследуемых видов (в среднем 35% за два года) (табл. 3). Максимальные потери зольных элементов получены для *M. trifoliata* и *S. palustris* (12,5 и 14% соответственно).

Кроме поверхностного опада трав, кустарничков и мхов, разложению подвергаются также и отмершие подземные органы растений – корни. Данные по скорости деструкции корней болотных растений малочисленны [5, 12]. Однако известно, что корневой опад гораздо медленнее подвергается разложению по сравнению с зелеными частями сосудистых растений [12]. Считается, что в корнях содержатся органические соединения, препятствующие их разложению, кроме того, сама кора корней, содержащая дубильные вещества и смолы, также способствует замедлению процессов деструкции [5].

Для определения скорости деструкции корней нами были заложены корни *C. rostrata*, *M. trifoliata* в торфяную залежь топи Кирсановского болота и *C. calyculata* (тонкие диаметром менее 2 мм и толстые диаметром 2–5 мм) в торфяную залежь рьяма Кирсановского болота. Результаты исследования показали, что наиболее быстро разлагаются корни *M. trifoliata* – потери массы составили за первый год 71% от исходного, корни *C. rostrata* разлагаются в три раза медленнее – потери органического вещества составили 21%. Наиболее медленно разлагаются толстые корни *C. calyculata* – 13%, тонкие корни *C. calyculata* разлагаются немного быстрее – 20%. Полученные данные в целом соответствуют приведенным в литературе [5, 12].

Процессы деструкции органического вещества растений являются неотъемлемой частью биологического круговорота. Чистая первичная продукция (NPP) и опад исследуемых растений рассмотрены в [3]. Накопление торфа происходит за счет более низкой скорости разложения растительных остатков, по сравнению с продукцией и отмиранием растений. Поскольку оценить скорость отмирания сфагновых мхов весьма затруднительно из-за особенностей роста сфагновых мхов, то мы принимали годичный опад мхов равным 70% от продукции [13]. Нами был выполнен расчет потерь растительного вещества сфагновых мхов в процессе разложения, происходившего в каждой исследуемой экосистеме, который показал, что скорость разложения сфагновых

мхов значительно ниже скорости ежегодного накопления биомассы мхов и поступления мохового опада. Для Бакчарского болота ежегодные потери органического вещества при разложении растительных остатков сфагновых мхов составляют от 3 г/м<sup>2</sup> в год для *S. magellanicum* на осоковой топи до 18 г/м<sup>2</sup> в год для *S. angustifolium* на высоком рьяме. На рьяме Кирсановского болота ежегодные потери органического вещества мхов в среднем равны 21 г/м<sup>2</sup> в год, изменяясь от 3 до 41 г/м<sup>2</sup> в год в зависимости от вида мха (табл. 5). Превышение ежегодной продукции сфагновых мхов над их разложением составляет от 3 до 25 раз. Минимальная разница между продукцией и деструкцией получена для *S. angustifolium*, максимальная – для *S. magellanicum*. Из ежегодного опада мха разложению подвергается лишь 3–18% на Бакчарском болоте и от 4 до 48% – на Кирсановском. К концу второго года эксперимента потери органического вещества сфагновых мхов возрастают и составляют в среднем для Бакчарского болота 13%, для Кирсановского – 24% от ежегодной продукции. В результате происходит постоянное накопление слаборазложившегося сфагнового торфа.

Таблица 5

**Продукция, опад и потери органического вещества при разложении растительных остатков исследуемых растений-торфообразователей**

| Группа растений | Фитоценоз | NPP, г/м <sup>2</sup> в год | Опад, г/м <sup>2</sup> в год | Разложение, г/м <sup>2</sup> |        |
|-----------------|-----------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|
|                 |           |                             |                              | 1 год                        | 2 года |
| Сфагновые мхи   | ВР        | 151                         | 106                          | 18                           | 34     |
|                 | НР        | 168                         | 118                          | 5                            | 7      |
|                 | ОТ        | 152                         | 106                          | 3                            | 18     |
|                 | КР        | 122                         | 85                           | 21                           | 30     |
| Кустарнички     | ВР        | 174                         | 136                          | 45                           | 61     |
|                 | НР        | 166                         | 106                          | 35                           | 75     |
|                 | ОТ        | 35                          | 34                           | 10                           | 12     |
|                 | КР        | 217                         | 100                          | 34                           | 95     |
|                 | КТ        | 0                           | 0                            | 0                            | 0      |
| Травы           | ВР        | 10                          | 8                            | 3                            | 8      |
|                 | НР        | 6                           | 6                            | 3                            | 5      |
|                 | ОТ        | 91                          | 97                           | 38                           | 48     |
|                 | КР        | 4                           | 4                            | 1                            | 3      |
|                 | КТ        | 107                         | 106                          | 43                           | 74     |
| Корни           | ВР        | 318                         | 223                          | 42                           | –      |
|                 | НР        | 280                         | 196                          | 37                           | –      |
|                 | ОТ        | 275                         | 193                          | 39                           | –      |
|                 | КР        | 494                         | 346                          | 66                           | –      |
|                 | КТ        | 685                         | 479                          | 101                          | –      |

Расчет потерь растительного вещества трав и кустарничков показал, что скорость разложения и трав, и кустарничков, так же, как у сфагновых мхов, значительно ниже скорости накопления их биомассы в течение вегетационного периода (табл. 5). Потери трав составляют в зависимости от вида фитоценоза от 1–2 г/м<sup>2</sup> в год на рямовых участках до 38–43 г/м<sup>2</sup> в год – на

топьяных. Ежегодные потери при деструкции растительных остатков трав на исследуемых фитоценозах Бакчарского болота в среднем в 2 раза ниже по сравнению с продукцией трав. На ряме и топи Кирсановского болота – в 6 и 2 раза соответственно. Из ежегодного опада трав деструкции в течение первого года подвергается в среднем 46% на Бакчарском болоте и 40% – на Кирсановском. Через два года от ежегодного опада остается только 4 и 25% на высоком и низком ряме Бакчарского болота, 45% – на осоково-сфагновой топи. На Кирсановском болоте при разложении ежегодного опада через два года остается 20 и 30% на ряме и топи соответственно.

При разложении кустарничков потери органического вещества составляют на рьях 34–35 г/м<sup>2</sup> в год, на осоково-сфагновой топи Бакчарского болота – 10 г/м<sup>2</sup> в год. Соотношение между продукцией и деструкцией кустарничков в среднем для исследуемых болотных фитоценозов составляет от 3 до 5 на Бакчарском болоте и 6,5 – на ряме Кирсановского болота. Из ежегодного опада листьев кустарничков в течение одного года разлагается в среднем 34% опада кустарничков. К концу второго года эксперимента из ежегодного опада разлагается на Кирсановском болоте 96%, на Бакчарском – 45, 70 и 37% на высоком, низком ряме и открытой топи соответственно.

Наиболее трудно оценить соотношение процессов продукции, отмирания и деструкции корней болотных экосистем. При оценке продуктивности болотных экосистем зачастую не проводятся исследования продуктивности корневых систем, в основном приводятся данные по запасам корней и динамике запасов живых корней, на основании которых рассчитывается продукция. Сведения об опадении корней болотных растений и их деструкции практически отсутствуют. Деятельный слой торфяной залежи густо пронизан корнями сосудистых растений, насыщенность корней в корнеобитаемом слое значительно выше по сравнению с минеральными почвами [5]. Согласно данным [14, 15], ежегодное поступление корневого опада составляет около 70–80% от продукции корней. При расчете опада корневых систем на исследуемых болотных фитоценозах мы принимали количество опада равным 70% от продукции корней. Так как скорость деструкции корней трав и кустарничков имеет разную величину, то для каждого фитоценоза рассчитывали количество опада корней трав и кустарничков пропорционально их вкладу в продукцию. Для рямовых участков доля корней кустарничков составляла в среднем 98% от общей продукции корней, для топьяных участков изменялась от 0 (топь Кирсановского болота) до 25% (осоково-сфагновая топь Бакчарского болота). Соответственно оставшаяся часть BNP (below-ground production – подземная продукция) и корневого опада обеспечивается корнями травянистой растительности. При разложении корней сосудистых растений потери массы составляют для болотных фитоценозов Бакчарского болота 37–47 г/м<sup>2</sup>год, для Кирсановского – 79–101 г/м<sup>2</sup>год (см. табл. 5). Соотношение между продукцией и деструкцией корней в среднем для исследуемых болотных фитоценозов равно от 7 до 8.

Также были оценены соотношение процессов накопления биомассы растений и потери органического вещества для исследуемых фитоценозов в целом (рис. 3). Для этого на основании данных по проективному покрытию травяного, кустарничкового и мохового ярусов были рассчитаны продукция для каждого исследуемого фитоценоза и потери органического вещества при деструкции растительных остатков. Потери органического вещества рассчитывались по следующей формуле:

$$D_{\phi} = \Sigma(D_{ki} * P_{ki}) + \Sigma(D_{ti} * P_{ti}) + \Sigma(D_{mi} * P_{mi}),$$

где  $D_{\phi}$  – потери органического вещества для фитоценоза;  $D_{ki}$ ,  $D_{ti}$ ,  $D_{mi}$  – потери органического вещества кустарничков, трав и мхов  $i$ -го вида;  $P_{ki}$ ,  $P_{ti}$ ,  $P_{mi}$  – проективное покрытие кустарничков, трав и мхов  $i$ -го вида в фитоценозе.

Результаты проведенных оценок продукционного и деструкционного процессов на исследуемых болотных фитоценозах олиготрофного типа показали, что в течение вегетационного периода на рямовых участках олиготрофных болот углерода накапливается в 1,1–2 раза больше, чем ежегодно отмирает, и в 4–7 раз больше, чем его теряется при разложении растительных остатков, что свидетельствует о постоянном стоке углерода из атмосферы и накоплении его как в виде растительности, так и в виде торфа.

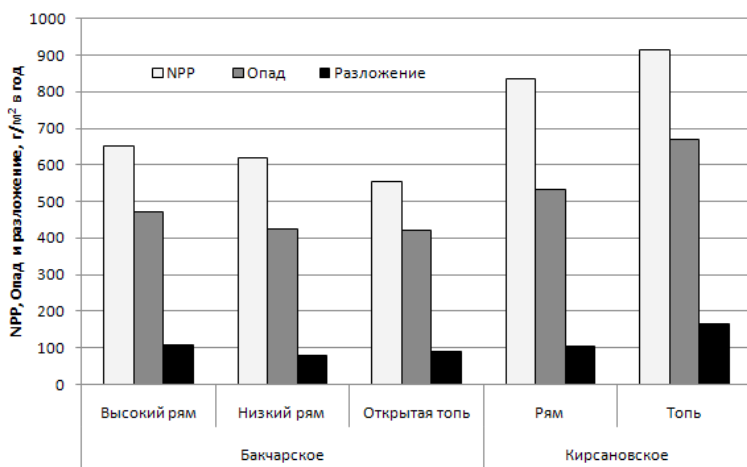


Рис. 3. Продукция (NPP), опад и потери органического вещества при разложении в исследуемых болотных фитоценозах

### Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что наиболее интенсивные процессы деструкции протекают на начальном этапе разложения, затем их скорость снижается. Наиболее устойчивы к разложению сфагновые мхи, за исключением *S. angustifolium*. Наименее устойчивы – травяни-

стые растения: *M. trifoliata*, *R. chamaemorus*. Кустарнички характеризуются средней скоростью разложения. Таким образом, основным торфообразователем в настоящее время на исследуемых олиготрофных болотах являются сфагновые мхи, о чем также свидетельствует ботанический состав торфяной залежи.

Динамика выноса углерода из растительных остатков растений-торфообразователей повторяет динамику потери массы органического вещества при деструкции. Вынос углерода при разложении растений-торфообразователей в течение года в зависимости от вида растения составляет от 3 (*S. fuscum*) до 72% (*M. trifoliata*) и в среднем для олиготрофных фитоценозов составляет 33%.

В процессе разложения растительных остатков в течение первого года, как правило, наблюдается иммобилизация азота во многих видах исследуемых растений (*S. fuscum*, *S. magellanicum*, *V. vitis-idea*, *A. polifolia*, *L. palustre*, *C. calyculata*, *V. oxycoccus*, *R. chamaemorus*). Максимальное накопление азота характерно для *S. fuscum* (187% от исходного количества).

Сравнение данных по чистой первичной продукции исследуемых фитоценозов и скорости деструкции показало, что количество запасаемого в процессе фотосинтеза углерода значительно превышает потери углерода при разложении растительных остатков как для отдельных видов растений (в 2–25 раз в зависимости от вида растений), так и для фитоценоза в целом (в 4–7 раз в зависимости от фитоценоза).

### Литература

1. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паришина Е.К. Фитомасса, продукция и разложение растительных остатков в олиготрофных болотах средней тайги Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. Вып. 3(81). С. 63–69.
2. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Трансформация природной среды в зоне действия Томского водозабора // ENVIROMIS. Труды межд. конф. Томск : ИОА, 2002. С. 244–251.
3. Головацкая Е.А. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биол. 2009. Т. 2, № 1. С. 38–53.
4. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Л. : Гидрометеиздат, 1989. Вып. 8. 201 с.
5. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л. : Наука, 1978. 176 с.
6. Агрохимические методы исследования почв. М. : Наука, 1975. 656 с.
7. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Л. : Наука, 1975. 105 с.
8. Аристовская Т.В. Микробиология подзолистых почв. М. ; Л. : Наука, 1965. 186 с.
9. Бамбалов Н.Н., Хоружик А.В., Лукошко Е.С., Стригуцкий В.П. Превращение отмерших растений в болотных биогеоценозах // Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот. М. : Наука, 1990. С. 53–63.

10. Соколов Д.Ф., Иваницкая Е.Ф. Влияние продуктов распада растительных остатков на лесорастительные свойства почв сосняков. М. : Наука, 1971. 159 с.
11. Базилевич Н.И., Тумлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / отв. ред. А.А. Тишков. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
12. Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2009. 23 с.
13. Пьявченко Н.И. О продуктивности болот Западной Сибири // Растительные ресурсы. 1967. Т. 67, № 3, 4. С. 523–532.
14. Persson H. Root dynamics in a young Scots pine stand in Central Sweden // Oikos. 1978. Vol. 30. P. 508–519.
15. Persson H., Stadenberg I. Fine root dynamics in a Norway spruce forest (*Picea abies* (L.) Karst) in eastern Sweden // Plant Soil. 2010. № 330. P. 329–344.

Поступила в редакцию 05.07.2013 г.

*Tomsk State University Journal of Biology. 2013. № 3 (23). P. 137–151*

doi: 10.17223/19988591/23/13

**Evgeniya A. Golovatskaya, Liliya G. Nikonova (Abzalimova)**

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System of the Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

#### **DECOMPOSITION OF PLANT RESIDUES IN PEAT SOILS OF OLIGOTROPHIC PEATLANDS**

*The study of the transformation of organic matter is of great importance at present time, due to climate change and the increasing level of human impact on natural ecosystems. In peatlands there is a constant exchange of minerals between plants and peat soils. The rate of decomposition of plant residues and release of these nutrients depend on individual characteristics of the chemical composition of plants and the environment in which these processes occur. Peatlands have a lower, compared with the net primary production, speed of transformation of organic matter of plants, due to which there is a constant accumulation of organic matter in the form of peat. To estimate the rate of peat accumulation and the amount of carbon stored in the form of peat from decomposition of crop residues, we carried out an investigation of the destruction of peat-forming plants (13 species), growing on oligotrophic peatlands of the southern taiga subzone of Western Siberia.*

*The studies revealed that the most intense transformation processes are at an early stage of decomposition, and then the degradation rate decreases. The most resistant to decomposition are sphagnum mosses, except *Sph. angustifolium*. The least resistant – herbaceous plants: *Menyanthes trifoliata*, *Rubus chamaemorus*. Shrubs are characterized by an average rate of decomposition. Thus, the main peat-forming plants, at present, in the studied oligotrophic bogs are sphagnum moss, as also evidenced by botanical composition of peat deposits. The dynamics of the removal of carbon from residues peat-forming plants have the same trends as the weight loss during organic matter destruction. Removal of carbon during decomposition of peat-forming plants during the year depending on the type of plant is from 3% (*Sphagnum fuscum*) to 72% (*Menyanthes trifoliata*), and the average for phytocenosis is 33%.*

*In the process of decomposition of plant residues in the first year, as a rule, there is immobilization of nitrogen in many of the studied plants (*S. fuscum*, *S. magellanicum*, *Vaccinium vitis-idea*, *Andromeda polifolia*, *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium oxycoccus*, *Rubus chamaemorus*). The maximum accumulation of nitrogen is characteristic for *S. fuscum* (187% of the initial quantity). A comparison of net primary production of the studied plant communities and the rate of destruction showed that the amount of carbon stored in the process of photosynthesis is much higher than the loss of carbon during decomposition of plant residues both for certain species of plants (2–25 times depending on the plant species) and for phytocenosis overall (4–7 times depending on phytocenosis).*

**Key words:** peatlands; peat-forming plants; rate of decomposition; removal of carbon; production.

*Received July 5, 2013*