

УДК 622.232(075.8)

РАСПАД БИОМАССЫ И ЭВОЛЮЦИЯ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

Казаченко Г.В. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

Предложена зависимость степени разложения торфяной залежи от времени. На ее основании дано соотношение для определения периода полураспада биомассы в болотных комплексах. Обоснованы геометрические параметры расширения болотных комплексов и представлены оценки состояния залежи в виде диаграммы. Приведен углеродный баланс залежи в зависимости от степени разложения.

Введение

В гео- и биохимических процессах, протекающих в биосфере, основной продукт трансформации – биомасса. Биомасса подвергается биохимической обработке и во многих производственных технологиях, которые в таких процессах имеют много общего с естественными и часто являются интенсифицированной модификацией природных. Поэтому моделирование естественных процессов распада биомассы – один из путей исследования и интенсификации биотехнологий, которые в настоящее время активно развиваются.

Один из естественных процессов трансформации биомассы – ее биохимическое разложение, которое в условиях избыточной влажности влечет образование первого в генетическом ряду каустобиолитов образования – торфа. В естественных условиях этот процесс протекает в течение нескольких тысячелетий и активно продолжается в настоящее время. Степень биохимического распада биомассы при образовании торфа чаще всего оценивается степенью R разложения, которая является одной из его важнейших характеристик. Существует несколько способов и шкал ее определения, результаты которых не всегда совпадают. Продолжительность процесса разложения во времени при изменяющихся климатических условиях и других факторах, влияющих на процесс, затрудняет его математическое моделирование. Вместе с тем необходимость прогнозирования развития торфяных месторождений и, особенно, в связи с их природоохранной ролью, требует создания соответствующих методов качественной и количественной оценки состояния и развития торфяных залежей, что невозможно без адекватных математических моделей. В последнее время появляются публикации [1, 2, 3], посвященные этой проблематике и освещающие те или иные стороны процесса развития торфяных болот и их экосистем.

Формирование модели и ее исследование

В [3] предложена математическая модель для определения средней степени разложения торфяной залежи, рассматриваемой как «слоеный пирог» с количеством слоев, равным возрасту залежи. Причем результаты решения согласуются как со средним значением степени разложения, так и рядом других характеристик залежи – глубиной, количеством твердого вещества. Использование этого алгоритма предполагает введение ряда параметров, которые менялись в истории эволюции залежи, и значения которых оценить часто затруднительно.

Поэтому представляется целесообразным получить какое-либо достаточно удобное для практического приложения приближенное выражение для расчетной оценки степени разложения торфяной залежи в зависимости от времени ее эволюции. Как и в [3] предлагаем использовать дифференциальное соотношение:

$$dR = k \frac{1-R}{R} dt, \quad (1)$$

где R – степень разложения торфа;

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа и вида залежи, условий ее образования.

Здесь принята абсолютная шкала измерения R , т.е. $0 \leq R \leq 1$.

Соотношение (1) интегрируется и при начальных условиях $t=0$, $R=0$ дает уравнение:

$$R + \ln(1-R) + kt = 0. \quad (2)$$

Поскольку точное решение этого уравнения не существует, то воспользуемся приближенным решением по методу Ньютона:

$$R = R_0 - \Delta R, \quad (3)$$

где R_0 – начальное приближение;

$$\Delta R = \frac{f(R_0)}{f'(R_0)} - \text{поправка по первому приближению};$$

$$f(R_0) = R_0 + \ln(1-R_0) + kt;$$

$$f'(R_0) = -\frac{R_0}{1-R_0}.$$

Так как точность решения во многом зависит от близости начального приближения к корню уравнения, то для его отыскания разложим выражение $\ln(1-R)$ в ряд по степеням R .

Тогда (2) преобразуется к виду:

$$R - \left(R + \frac{R^2}{2} + \frac{R^3}{3} + \dots \right) + kt = 0,$$

или

$$-\left(\frac{R^2}{2} + \frac{R^3}{3} + \dots \right) + kt = 0.$$

Учитывая, что R меньше единицы и ограничившись для начального приближения первым членом ряда в скобках левой части, получаем в качестве начального приближения:

$$R_0 = \sqrt{2kt}. \quad (4)$$

Тогда:

$$f(R_0) = \sqrt{2kt} + \ln(1 - \sqrt{2kt}) + kt;$$

$$f'(R_0) = -\frac{\sqrt{2kt}}{1 - \sqrt{2kt}}.$$

Подставив это в (3), имеем:

$$R = \sqrt{2kt} - \frac{f(\sqrt{2kt})}{f'(\sqrt{2kt})}. \quad (5)$$

Эта формула иллюстрируется на рисунке 1.

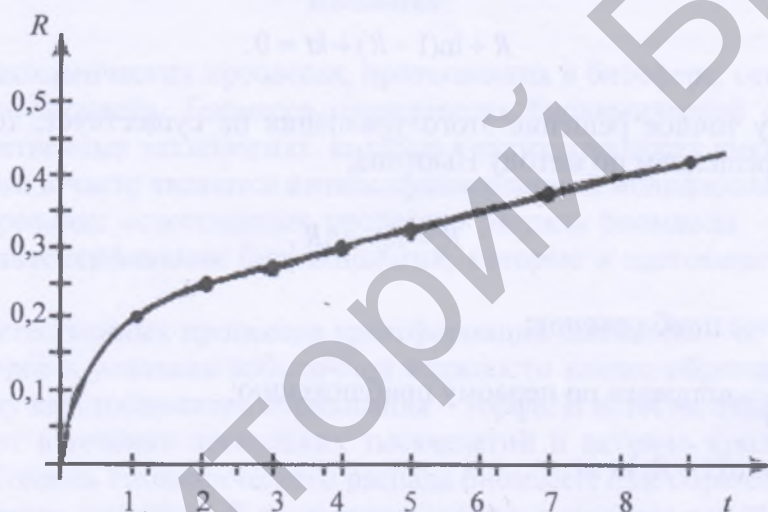


Рисунок 1 – Зависимость степени разложения торфа от времени

Представленный график показывает, что наиболее эффективно процесс разложения протекает в начальный период образования и развития торфяной залежи.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными на основании использования модели «слоеный пирог».

Как и при радиоактивном распаде в этом случае можно использовать понятие периода полураспада, т.е. периода достижения торфом степени разложения $R = 0,5$.

Действительно, подставив $R = 0,5$ в (2), имеем $0,5 + \ln 0,5 + kt_{0,5} = 0$ или

$$t_{0,5} = \frac{2 \ln 2 - 1}{2k} \approx \frac{0,19}{k}, \quad (6)$$

где $t_{0,5}$ – период полураспада биомассы торфяной залежи.

Эта величина может быть взята в качестве оценки интенсивности процесса разложения биомассы в торфяных залежах.

Процесс торфообразования характеризуется также ростом общего объема торфяной залежи. Изменение объема залежи и площади ее поверхности в процессе разви-

тия оценим, считая, что тело залежи растет, не деформируя поверхности, на которой оно растет.

Обозначим площадь поверхности торфяной залежи через S , а ее периметр через Π (рисунок 2). Из общих соображений подобия можно записать:

$$\Pi = k_s \cdot \sqrt{S}, \quad (7)$$

где k_s – коэффициент, зависящий от формы поверхности залежи.

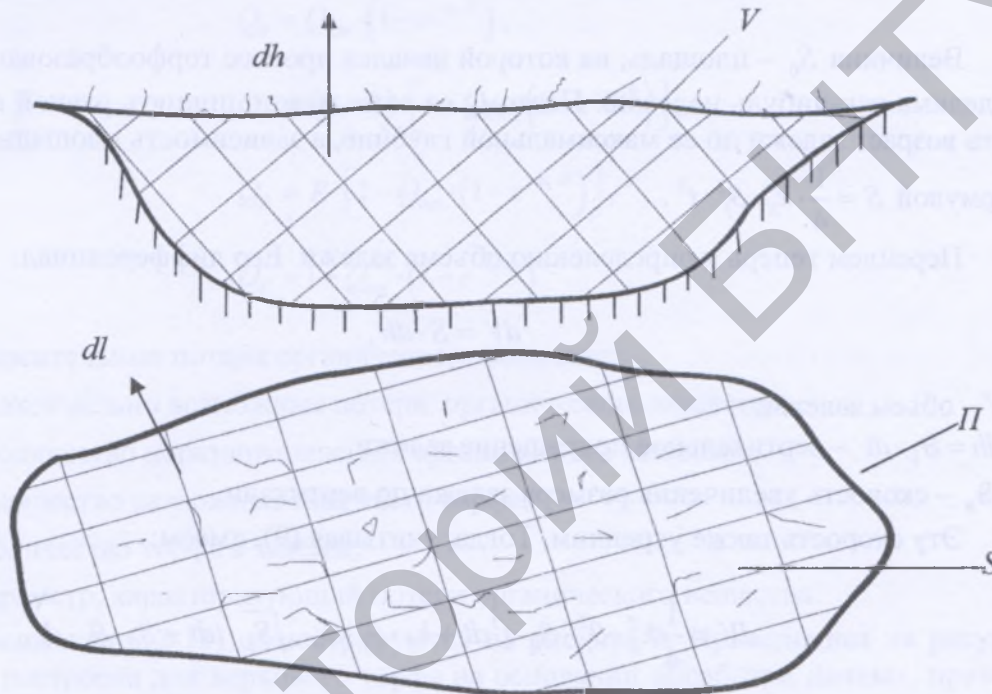


Рисунок 2 – К изменению объема залежи

С другой стороны, если через dl обозначить приращение размера залежи по нормали к периметру, то приращение площади залежи

$$dS = \Pi \cdot dl,$$

$$dl = \vartheta_l \cdot dt,$$

где ϑ_l – скорость приращения размера залежи по нормали к периметру.

Эта скорость существенно зависит от геометрии ложа залежи, а также от ряда других факторов и может существенно меняться в различные периоды эволюции. Поэтому введем в рассмотрение среднее значение этой скорости, тем более что рассматриваются большие промежутки времени.

Тогда на основании (7):

$$dS = k_s \cdot \sqrt{S} \vartheta_l \cdot dt. \quad (8)$$

Разделяя переменные и интегрируя, имеем:

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ № 2, 2011

$$\sqrt{S} = \frac{1}{2} \cdot k_s \cdot g_l \cdot t + C.$$

Считая, что при $t = 0$, $S = S_0$, находим $C = \sqrt{S_0}$. Тогда $\sqrt{S} = \frac{1}{2} \cdot k_s \cdot g_l \cdot t + \sqrt{S_0}$, а

$$S = \frac{1}{4} k_s^2 \cdot g_l^2 \cdot t^2 + k_s \cdot g_l \cdot \sqrt{S_0} \cdot t + S_0. \quad (9)$$

Величина S_0 – площадь, на которой начался процесс торфообразования, вряд ли определима как-нибудь надежно. Поэтому ее тоже можно принять равной нулю и оценивать возраст залежи по ее максимальной глубине, а зависимость площади от времени – формулой $S = \frac{1}{4} \cdot k_s \cdot g_l^2 \cdot t^2$.

Перейдем теперь к определению объема залежи. Его дифференциал:

$$dV = S \cdot dh,$$

где V – объем залежи;

$dh = g_h \cdot dt$ – вертикальное приращение залежи;

g_h – скорость увеличения размера залежи по вертикали.

Эту скорость также усредним. Тогда, учитывая (9), имеем:

$$dV = \frac{1}{4} k_s^2 \cdot g_l^2 \cdot g_h \cdot t^2 dt + k_s \cdot g_l \cdot g_h \cdot \sqrt{S_0} \cdot t dt + S_0 \cdot g_h \cdot dt. \quad (10)$$

Проинтегрировав, получим:

$$V = \frac{1}{12} \cdot k_s^2 \cdot g_l^2 \cdot g_h \cdot t^3 + \frac{1}{2} k_s \cdot g_l \cdot g_h \cdot \sqrt{S_0} \cdot t^2 + S_0 \cdot g_h \cdot t + C.$$

Приняв, как и выше, что при $t = 0$, $V = V_0$, находим $C = V_0$. Так как $V_0 = 0$, то окончательно:

$$V = \frac{1}{12} \cdot k_s^2 \cdot g_l^2 \cdot g_h \cdot t^3 + \frac{1}{2} k_s \cdot g_l \cdot g_h \cdot \sqrt{S_0} \cdot t^2 + S_0 \cdot g_h \cdot t. \quad (11)$$

Также как и при определении площади поверхности, установим $S_0 = 0$, тогда имеем упрощенную формулу для определения объема: $V = \frac{1}{12} \cdot k_s^2 \cdot g_l^2 \cdot g_h \cdot t^3$.

Эти соотношения показывают, что приращение площади торфяной залежи пропорционально квадрату, а объема – кубу времени. Полученные соотношения частично объясняют увеличение запасов торфа, которое регистрируется в информационных источниках с течением времени.

Скорости \mathcal{Q}_h и \mathcal{Q}_l зависят от географических, геологических и климатических факторов, и их оценки изменяются в значительных пределах. Скорость \mathcal{Q}_l горизонтального роста может быть как положительной (естественные болота), так и отрицательной при антропогенных воздействиях.

Полученные зависимости, а также балансовые соотношения по составу торфяной залежи, позволили получить выражения для определения потерь биомассы в разложившейся и неразложившейся части торфяной залежи. Эти зависимости [3] приводим без вывода:

$$Q_n = Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi_1 \cdot R}), \tag{12}$$

$$Q_N = (1 - R) \cdot [1 - Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi_1 \cdot R})], \tag{13}$$

$$Q_R = R \cdot [1 - Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi_1 \cdot R})], \tag{14}$$

$$Q_T = 1 - Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi_1 \cdot R}), \tag{15}$$

где Q_n – относительные потери органического вещества;

Q_{nm} – максимально возможные потери органического вещества;

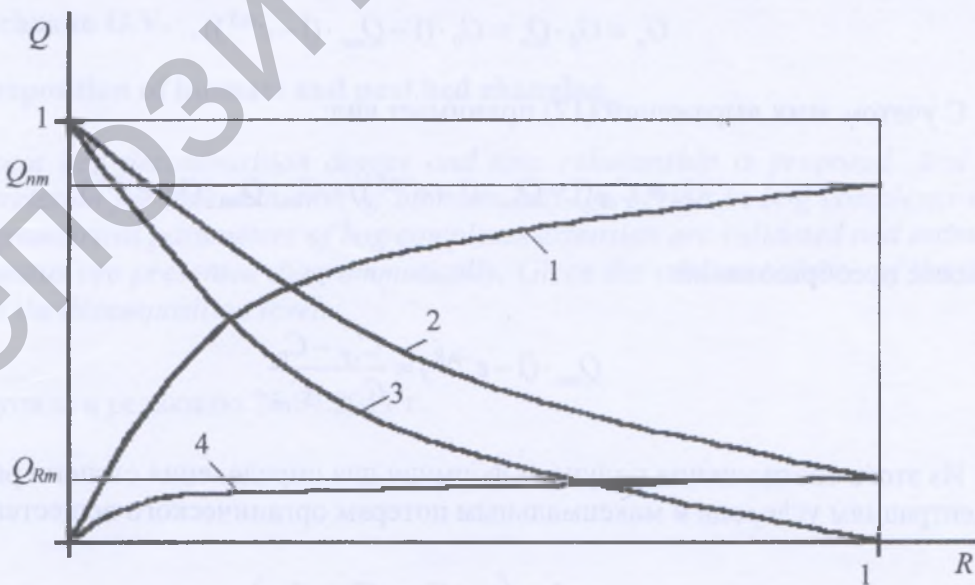
Q_N – количество неразложившегося органического вещества;

Q_R – количество разложившейся части торфа;

Q_T – количество торфа в залежи;

φ_1 – параметр, характеризующий потери органического вещества.

Зависимости (12-15) иллюстрируются на рисунке 3. Приведенная на рисунке 3 диаграмма построена для верхового торфа на основании обработки данных, приведенных в [5].



1 – $Q_n = Q_n(R)$; 2 – $Q_T = Q_T(R)$; 3 – $Q_N = Q_N(R)$; 4 – $Q_R = Q_R(R)$;

Q_{Rm} – максимально возможное количество разложившейся биомассы

Рисунок 3 – Диаграмма состояния торфяной залежи в зависимости от степени разложения

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ № 2, 2011

Для оценки и прогнозирования состояния торфяной залежи очень важным показателем является содержание углерода. При определении его количества также используем балансовое соотношение:

$$G_c = G_{cT} + G_{cn}, \quad (16)$$

где G_c – общее количество углерода, содержащееся в биомассе, поступившей в залежь;
 G_{cT} – количество углерода в залежи;
 G_{cn} – количество углерода, которое выделилось из залежи вместе с органическим веществом.

Запишем (16), определив G_c , G_{cT} и G_{cn} посредством концентрации углерода в соответствующих количествах биомассы, торфа и потерь органического вещества:

$$G_0 \cdot C_0 = G_T \cdot C_{cT} + G_n \cdot C_{cn}, \quad (17)$$

где G_0 – количество биомассы, поступившей в залежь;
 G_T – количество торфа в залежи;
 G_n – потерянное количество органического вещества;
 C_0 , C_{cT} , C_{cn} – концентрации углерода в исходной биомассе, торфе и потерянном органическом веществе.

Используя вычисления G_0 , G_T , G_n посредством (12-17) и выполнив некоторые преобразования, получим:

$$G_T = G_0 \cdot Q_T = G_0 \cdot (1 - Q_{nm} \cdot (1 - e^{\varphi R})),$$

$$G_n = G_0 \cdot Q_n = G_0 \cdot (1 - Q_{nm} \cdot (1 - e^{\varphi R})).$$

С учетом этих выражений (17) принимает вид:

$$G_0 = C_{cT} (1 - Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi R})) + C_{cn} \cdot Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi R})$$

или после преобразований:

$$Q_{nm} \cdot (1 - e^{-\varphi R}) = \frac{C_{cT} - C_0}{C_{cT} - C_{cn}}.$$

Из этого соотношения получаем формулу для определения степени разложения по концентрациям углерода и максимальным потерям органического вещества:

$$R = -\frac{1}{\varphi} \ln \left(1 - \frac{C_{cT} - C_0}{C_{cT} - C_{cn}} \cdot \frac{1}{Q_{nm}} \right). \quad (18)$$

Заключение

Таким образом, получены соотношения для определения средней степени разложения залежи в зависимости от времени ее образования и условий эволюции, а также по содержанию углерода в исходной биомассе, торфе и потерях органического вещества в процессе торфообразования. Полученные выражения могут быть использованы как для прогнозирования развития торфяных месторождений, так и для оценки распределения исходной биомассы в торфяной залежи и ее потерь в процессе эволюции последней.

Список использованных источников

1. **Инишева, Л.Н.** Возникновение и скорость развития процесса заболачивания на западно-сибирской равнине / Л.Н. Инишева, О.Л. Лисс // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии. – Минск, 2006. – С. 308-311.
2. **Панов, В.В.** Модели генезиса и принципы развития торфяных болот при их восстановлении / В.В. Панов // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии. – Минск, 2006. – С. 361-365.
3. **Казаченко, Г.В.** Математическое моделирование эволюции торфяной залежи / Г.В. Казаченко // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии. – Минск, 2006. – С. 312-315.
4. **Казаченко Г.В.** Моделирование состояния торфяной залежи в зависимости от степени разложения / Г.В. Казаченко // Современные проблемы механики торфа в процессах добычи и переработки. – Минск, 2002. – С. 48-53.
5. **Лиштван, И.И.** Основные свойства торфа и методы их определения / И.И. Лиштван, Н.Т. Король. – Минск: Наука и техника, 1975. – 320 с.

Kazachenko G.V.

Decomposition of biomass and peat bed changing

The peat bed decomposition degree and time relationship is proposed. And based upon the correlation for determination of biomass half-life period in bog complexes is presented. The geometrical parameters of bog complexes extension are validated and estimations of peat bed status are presented diagrammatically. Given the carbon balance of the deposit depending on the decomposition level.

Поступила в редакцию 26.04.2011 г.