

УДК 631.431: 631.615

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАДКИ ТОРФА В ПРОЦЕССЕ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

**П.К. Черник**, кандидат технических наук

**Г.В. Азява**, начальник технического отдела  
РУП «Белгипроводхоз»

**Н.М. Авраменко**, кандидат технических наук  
ПОСМЗиЛ

**О.А. Рудой**, старший научный сотрудник

**Р.Г. Слагада**, научный сотрудник  
Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси

**Ключевые слова:** торф, осушение, осадка, уплотнение, сработка, минерализация, органическая и минеральная составляющие

**Введение**

После осушения под действием большого количества факторов (физико-механических, биохимических, природно-климатических, антропогенных) происходит осадка поверхности залежи (снижение толщины слоя торфа). Количественное влияние отдельных факторов на величину осадки в различные периоды времени после осушения и на разной глубине от поверхности значительно отличается. Кроме того, как правило, свойства торфа в зависимости от глубины залежи также значительно различаются, что необходимо учитывать при прогнозе осадки торфа после осушения.

Целью исследований являлось установление закономерностей снижения толщины отдельных слоев торфа и получение зависимостей, позволяющих прогнозировать осадку поверхности залежи на любой период времени после осушения. Такой прогноз на любой рассматриваемый момент времени необходим для оценки:

- а) толщины остаточного слоя торфяной почвы и степени ее трансформации;
- б) глубины заложения закрытого дренажа и целесообразности его дальнейшего использования при реконструкции мелиоративных систем;
- в) изменения рельефа поверхности и принятия решений о дальнейшем использовании участков с трансформированной торфяной почвой.

**Прогноз осадки торфа после осушения под воздействием физико-механических факторов**

При понижении уровня грунтовых вод в результате осушения в залежи возникают гравитационные и капиллярные силы, которые обуславливают уплотнение торфа. В результате уплотнения происходит осадка поверхности залежи и снижение ее мощности.

Сразу после осушения интенсивность процесса уплотнения и, соответственно,

осадки (снижения мощности залежи) наибольшая, затем она снижается по мере стабилизации нагрузки от гравитационных и капиллярных сил. Однако при этом процесс уплотнения под действием указанных сил не прекращается, а продолжает нарастать с уменьшающейся интенсивностью практически бесконечно, так как торф характеризуется явно выраженными реологическими свойствами. На данном этапе деформации уплотнения обусловлены в основном процессом ползучести.

По мере снижения влажности торфа все большее влияние на процесс уплотнения начинают оказывать усадка и разрушение структуры в пахотном слое при обработке почвы и уплотняющее воздействие сельскохозяйственных машин, в результате чего плотность верхних слоев существенно возрастает.

Указанные физико-механические факторы обуславливают уплотнение и повышение содержания органического вещества в единице объема формирующейся после осушения торфяной почвы.

Кроме физико-механических факторов, на процесс снижения мощности торфяной залежи влияют биохимические процессы, вынос растениями питательных веществ, вымывание, ветровая, водная и механическая эрозии, которые обуславливают сработку (снижение содержания) органического вещества в процессе сельскохозяйственного использования торфа.

После осушения в результате создания благоприятного водно-воздушного режима для развития аэробных микроорганизмов происходит процесс разложения органического вещества (нитрификация). Интенсивность процесса нитрификации практически не зависит от характера сельскохозяйственного использования осушенного торфа, а зависит лишь от складывающегося в различные периоды года водно-воздушного режима.

Суммарное воздействие комплекса факторов на процесс осадки (снижения мощности залежи) проявляется неодинаково не только во времени, но и по глубине. С увеличением глубины интенсивность процесса уплотнения снижается и на глубине 3 м от поверхности деформации уплотнения имеют настолько малые значения, что при расчете осадки ими можно пренебречь.

Сработка торфа – это снижение в формирующейся после осушения торфяной почве содержания органического вещества в результате его разложения, выноса растениями питательных веществ, вымывания и эрозии.

Так как интенсивность процесса уплотнения верхнего слоя торфа в залежи наибольшая, то содержание органического вещества в единице объема торфа в этом слое возрастает в результате значительного увеличения плотности, но при этом в результате снижения мощности залежи определение валового органического вещества в целом в залежи поступательно снижается. Поэтому не допускается производить оценку степени сработки торфа по величине осадки (снижения мощности залежи) в сантиметрах или миллиметрах в год, так как этот показатель не отражает физической сущности процесса

сработки, которая определяется не снижением мощности залежи, а снижением содержания органического вещества в целом в залежи.

Определяющими интенсивность процесса осадки торфа на разных стадиях трансформации торфа являются различные факторы. Устоявшееся мнение, что определяющим интенсивность осадки торфа является процесс разложения органического вещества и, как следствие этого, минерализация торфа, является не вполне обоснованным. Минерализация является следствием не только разложения органического вещества, но определяется в большей степени привнесением в торф в процессе сельскохозяйственного использования минеральной составляющей из-за пределов болотного массива, а также из подстилающих торф минеральных грунтов.

По мере увеличения содержания в торфе привнесенной минеральной составляющей и разрушения структуры торфа при обработке почвы возрастает роль ветровой эрозии в процессе снижения содержания органического вещества, а при образовании в результате уплотнения торфа выраженного рельефа возрастает и роль водной эрозии.

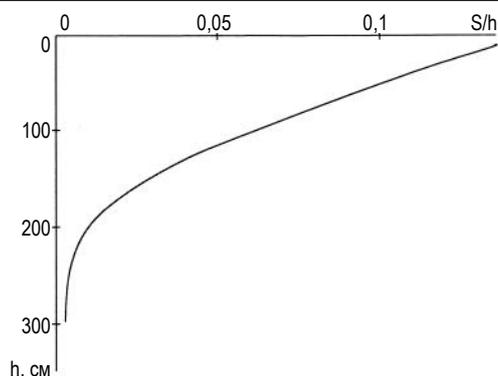
При выраженном (бугристом) рельефе в результате водной эрозии происходит перераспределение органического вещества по площади (по элементам рельефа), что обуславливает различное содержание органического вещества на отдельных участках и пестроту почвенного покрова.

Сразу после осушения под действием капиллярных сил и возросшего веса верхних осушенных слоев, а также в результате удаления из пор торфа свободной воды процесс уплотнения происходит с большой интенсивностью, а затем по мере отжатия свободной воды интенсивность уплотнения поступательно снижается. Наибольшая его интенсивность наблюдается в течение первого года после осушения, и этот период можно принять в качестве периода компрессионного уплотнения. Затем интенсивность процесса уплотнения поступательно снижается. На данном этапе процесс уплотнения определяют ползучесть, усадка и необратимые изменения в структуре верхних слоев торфа при высыхании, а также уплотнение под воздействием сельскохозяйственной техники. На этой стадии на процесс снижения мощности торфяной залежи, кроме уплотнения и усадки, начинает оказывать значимое влияние и эрозия, в основном ветровая.

Величина нагрузки от физико-механических факторов, определяющих уплотнение, изменяется по глубине, что и определяет различную величину деформаций уплотнения отдельных слоев торфа по глубине.

Установить величину нагрузки экспериментальным путем практически невозможно. Кроме того, величина уплотнения зависит от вида торфа и его состояния, в первую очередь от плотности и влажности в естественном состоянии (в залежи), которые изменяются в широком диапазоне.

На рис. 1 показано изменение относительных деформаций уплотнения  $S/h$  отдельных слоев торфа по глубине залежи, полученное по данным наблюдений на опыт-



**Рис. 1. Изменение относительных деформаций уплотнения торфа  $S/h$  по глубине через год после осушения**

ных площадках через год после осушения ( $S$  – деформация уплотнения рассматриваемого слоя толщиной  $h$ ).

Деформации уплотнения каждого слоя на опытных площадках определялась по осадочным маркам, заложенным до осушения на различной глубине. Обработка почвы на опытных площадках не производилась, что исключало влияние эрозии и уплотнения сельскохозяйственной техникой, и поэтому можно считать, что в первый год после осушения уплотнение торфа на опытных площадках происходило только под действием физико-механических сил (компрессионное уплотнение).

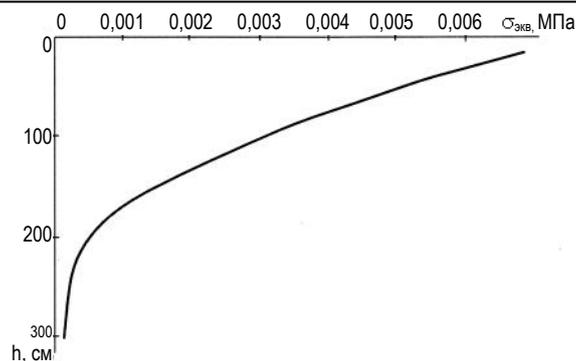
Анализ результатов натуральных наблюдений показал, что на опытных площадках, расположенных на одном объекте с одинаковыми видами, но с различной глубиной торфа до осушения, значения относительного уплотнения отдельных слоев  $S/h$ , расположенных на одной и той же глубине от поверхности, совпадают. Следовательно, глубина торфа не оказывает влияния на величину относительного уплотнения отдельных слоев, которая определяется величиной уплотняющей нагрузки  $\sigma$ , действующей на соответствующий слой.

На площадках с другими видами торфа характер изменения  $S/h$  по глубине сохраняется таким же, но величина  $S/h$  для одинаковых по расположению от поверхности слоев отличается.

На рис. 2 показано изменение уплотняющей нагрузки  $\sigma_{экв}$  по глубине для опытной площадки, изменение относительных деформаций уплотнения по глубине для которой показано на рис. 1. Значения  $\sigma_{экв}$  определялись по экспериментальным компрессионным кривым для каждого вида торфа при фактически достигнутых значениях относительных деформаций уплотнения рассматриваемого слоя через год после осушения  $S/h$  (рис.1).

Характер изменения полученных значений  $\sigma_{экв}$  по глубине, показанный на рис. 2, аналогичен изменению относительных деформаций уплотнения  $S/h$  (рис.1).

Значения  $\sigma_{экв}$ , полученные в результате обработки данных наблюдений за послойным уплотнением торфа, для каждого равноудаленного от поверхности слоя по всем опытным площадкам с различной глубиной и разными видами торфа практически совпали.



**Рис. 2. Распределение эквивалентной уплотняющей нагрузки по глубине**

Практическое совпадение значений  $\sigma_{\text{экв}}$  для равноудаленных от поверхности слоев на разных опытных площадках с различной глубиной и разными видами торфа свидетельствует о том, что величина  $\sigma_{\text{экв}}$  не зависит от глубины и свойств торфа, а определяется в основном нормой осушения. Следовательно, полученные по экспериментальным данным средние значения  $\sigma_{\text{экв}}$  для каждого расчетного слоя можно принять в качестве расчетной нагрузки, эквивалентной равномерно распределенной по поверхности каждого расчетного слоя, при расчете деформаций компрессионного уплотнения (под действием физико-механических факторов) каждого расчетного слоя через год после осушения.

Расчетные значения  $\sigma_{\text{экв}}$  для каждого расчетного слоя следует принимать по таблице.

Так как эквивалентная нагрузка  $\sigma_{\text{экв}}$  изменяется по глубине с различной интенсивностью (рис. 2), то расчетные слои для однородной залежи следует принимать в соответствии с таблицей.

**Значения эквивалентных нагрузок  $\sigma_{\text{экв}}$**

Расчетный слой, см	0-100	100-150	150-200	200-250	250-300	более 300
$\sigma_{\text{экв}}$ , МПа	0,00520	0,00225	0,00095	0,00035	0,00015	0,0001

При неоднородной по составу залежи, если в пределах одного расчетного слоя, рекомендуемого таблицей, будет два вида торфа с различными значениями показателей физических свойств, то толщину расчетных слоев следует принимать равной фактической толщине слоя каждого вида торфа, а значения  $\sigma_{\text{экв}}$ , определять по рис. 2 для значений  $h$ , равным расстоянию от поверхности залежи до середины рассматриваемого расчетного слоя.

При отсутствии экспериментальных данных по определению сжимаемости компрессионные кривые следует рассчитывать для каждого вида торфа по показателям физических свойств, полученным при выполнении инженерно – геологических изысканий до осушения, по формуле:

$$\frac{S_{oi}}{h_{oi}} = p_{oi} \left[ 1 - \frac{D_{ashi}}{100} \right] \left[ 0,29 + 0,38 W_{oi} 1g \frac{\sigma_i}{0,0001} - 0,41 W_{oi} - 1,92 \right], \quad (1)$$

где  $S_{oi}$  – деформация уплотнения органической составляющей в расчетном слое через год после осушения, см;

$h_{oi}$  – толщина слоя, занимаемая органической составляющей в рассматриваемом расчетном слое, см;

$\rho_{di}$  – плотность сухого торфа (скелета), г/см<sup>3</sup>;

$D_{ash}$  – степень зольности торфа, %;

$W_{oi}$  – влажность органической составляющей торфа в долях единицы.

В водонасыщенном торфе (до осушения) основная часть объема твердой фазы приходится на органическую составляющую, которая связывает и удерживает за счет сил молекулярного притяжения подавляющую часть объема воды, содержащейся в торфе. Содержание минеральной составляющей и, соответственно, удерживаемой ею воды несопоставимо мало в сравнении с органической составляющей и поэтому сжимаемостью минеральной составляющей для практических расчетов можно пренебречь, а компрессионные кривые рассчитывать для органической составляющей.

Вычисленная по указанным компрессионным кривым деформация слоя, занимаемого органической составляющей в залежи, и будет составлять осадку торфа, так как минеральная составляющая принимается несжимаемой.

При расчете компрессионных кривых необходимо для каждого вида торфа определить расчетные показатели свойств и состава согласно рекомендациям [1].

На рис. 3,а приведены экспериментальные компрессионные кривые для двух видов торфа, которые являются характерными и для всех других видов, так же как и для других видов грунтов, а также для органической составляющей торфа.

Компрессионные зависимости для торфа, так же как и для других видов грунтов, не могут быть описаны ни одной из элементарных функций.

На рис. 3,б приведены те же кривые в полулогарифмических координатах. Как следует из приведенных данных для торфа, относительные деформации уплотнения в определенном интервале изменяются прямо пропорционально логарифму уплотняющих нагрузок и на этом участке зависимость может быть представлена логарифмической функцией, так же как и для других видов грунтов.

Формула (1) была получена для расчета осадки возводимых на биогенных грунтах сооружений (земляных плотин, дамб, дорог), нагрузки от которых находятся в указанном диапазоне пропорциональности относительных деформаций  $S_0/h_0$  от логарифма уплотняющих нагрузок  $\sigma$  и справедлива в диапазоне нагрузок от 0,005-0,01 до 0,3-0,5 МПа.

Уплотняющие нагрузки от осушения меньше нижнего предела, при котором применима формула (1). Отклонение фактических значений от рассчитанных при малых величинах уплотняющей нагрузки объясняется характером изменения самой логарифмической функции («ленивой функции») при малых по величине значениях аргумента. При приближении величины нагрузки  $\sigma$  к нулю функция стремится к минус бесконечности.

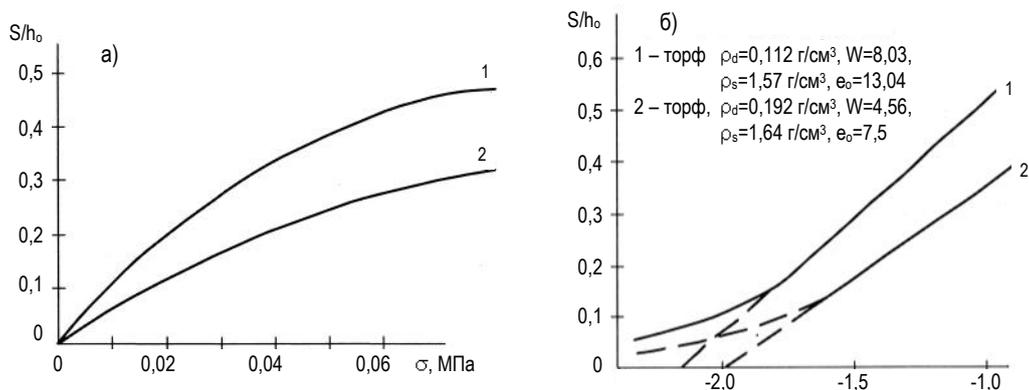


Рис. 3. Экспериментальные компрессионные кривые

Так как в натуральных координатах ( $S_o/h_o - \sigma_{\text{экв}}$ ) относительные деформации уплотнения  $S_o/h_o$  монотонно возрастают с увеличением нагрузки  $\sigma$  (рис. 3,а) во всем диапазоне нагрузок и для всех видов грунтов, то рассчитанные по формуле (1) компрессионные кривые на начальном участке можно экстраполировать до нуля (рис. 4).

Для упрощения расчета компрессионных кривых формулу (1) целесообразнее представить в виде

$$\frac{S_{oi}}{h_{oi}} = \rho_d \left( 1 - \frac{D_{ash}}{100} \right) \cdot F = M_o \cdot F, \quad (2)$$

$$\text{где функция } F = \left[ \left( 0,29 + 0,38W_o \right) 1g \frac{\sigma}{0,0001} - 0,41W_o - 1,92 \right];$$

$M_o$  – масса органической составляющей в единице объема торфа.

Графики функции  $F$ , экстраполированные на начальном участке для малых значений  $\sigma$ , приведены на рис. 5.

Задаваясь различными значениями  $\sigma$ , при известных значениях плотности сухого торфа  $\rho_d$ , степени зольности  $D_{ash}$ , влажности органической составляющей  $W_o$  и опреде-

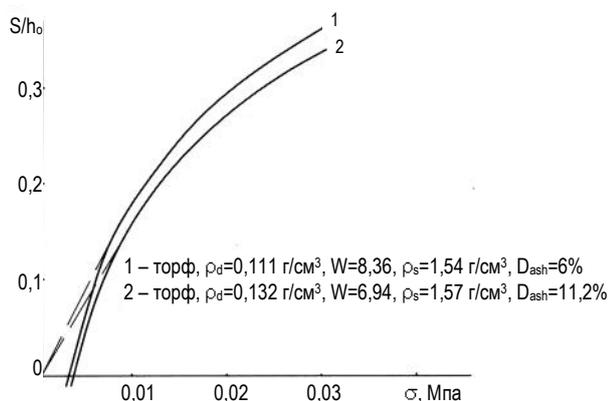


Рис. 4. Расчетные компрессионные кривые

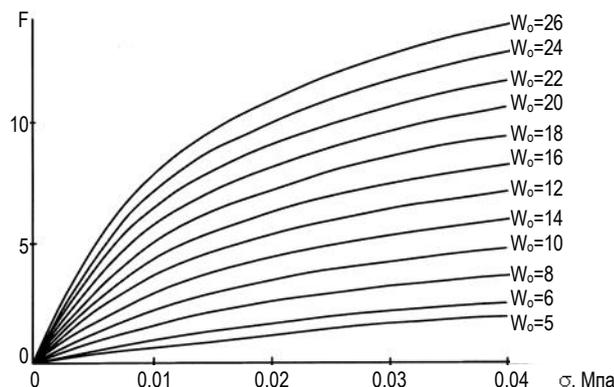


Рис. 5. Значения функции  $F$

ленной по рис. 5 функции  $F$  по формуле (2) вычисляются значения  $S_{oi}/h_{oi}$ , по которым строятся компрессионные кривые для каждого вида торфа.

По значениям  $\sigma_{\text{экв}}$ , определенным по рис. 2 или табл. 1 для каждого расчетного слоя, по компрессионным кривым для вида торфа в рассматриваемом слое определяются соответствующие значения относительных деформаций уплотнения  $S_{oi}/h_{oi}$ . Умножая полученные значения на толщину расчетного слоя  $h_{oi}$  определяют деформацию уплотнения слоя  $S_{oi}$  через год после осушения.

Общая деформация уплотнения (осадка торфа) через год после осушения  $S_o$  определяется как сумма деформаций уплотнения отдельных слоев:

$$S_o = \sum_{i=1}^n S_{oi}. \quad (3)$$

#### **Прогноз осадки торфа во времени под воздействием физико-механических факторов и сработки**

В дальнейшем осадку торфа в большей степени, чем физико-механические, определяют такие факторы, как разложение органического вещества, вымывание, вынос питательных веществ растениями, а также ветровая, водная и техническая эрозии пахотного слоя, роль которых во времени поступательно возрастает.

Сразу после осушения (до одного года) физико-механические факторы, обуславливающие уплотнения, являются определяющими величину осадки торфа. Роль факторов сработки на данном этапе несопоставимо мала. Доля каждого из факторов в процессе снижения толщины слоя торфа (осадки) постоянно изменяется во времени. Доля компрессионного уплотнения поступательно снижается, но возрастает доля деформаций ползучести, уплотнения под воздействием сельскохозяйственной техники и эрозии.

Интенсивность осадки торфа во времени по отдельным смежным годам может значительно отличаться, что является следствием увеличения в отдельные годы и пе-

риоды в течение одного года роли таких факторов, как изменение водного режима и эрозии, которая определяется характером сельскохозяйственного использования осушенного торфа, природно-климатическими факторами, в первую очередь скоростями ветра в периоды отсутствия растительности на обработанном поле.

На необрабатываемых площадках колебания интенсивности нарастания осадки между смежными годами имеют значительно меньшие значения, чем на обрабатываемых участках, что можно объяснить снижением влияния роли фактора эрозии на величину осадки на необрабатываемых участках.

На рис. 6 приведено изменение относительных деформаций уплотнения отдельных слоев торфа после осушения во времени на опытной площадке. Линии на рисунке построены по результатам статистической обработки и являются осредненными данными наблюдений за деформациями уплотнения отдельных слоев.

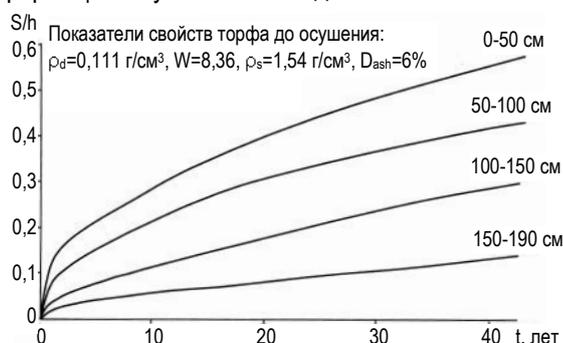


Рис. 6. Изменение относительных деформаций уплотнения отдельных слоев торфа во времени после осушения на опытной площадке

В результате анализа данных натурных наблюдений установлено, что относительные деформации уплотнения  $S_i/h_i$  расчетного слоя на любой момент времени определяются по формуле

$$\frac{S_i}{h_i} = \frac{S_{oi}}{h_{oi}} \cdot t^{0,4}, \quad (4)$$

где  $S_{oi}/h_{oi}$  – относительная деформация уплотнения органической составляющей  $i$ -того слоя через год после осушения;

$t$  – количество лет после осушения,  $t > 1$ .

Осадку поверхности торфяной залежи после осушения на любой момент времени  $t$  более одного года следует рассчитывать по следующим формулам:

при использовании осушенного торфа под луговые земли (бессменная культура трав);

$$S = \sum_{i=1}^n S_{oi} \cdot t^{0,4} = S_o t^{0,4} \quad (5)$$

при использовании в севооборотах

$$S = \sum_{i=1}^n S_{oi} \cdot t^{0,43} = S_o t^{0,43} \quad (6)$$

при использовании под пропашными.

$$S = \sum_{i=1}^n S_{oi} \cdot t^{0,45} = S_o t^{0,45} \quad (7)$$

Формулы (5)-(7) применимы для расчета осадки торфа до момента времени  $t_i$ , когда остаточный слой торфа (средний на участке, поле) составляет более 30-35 см. При меньших значениях торф теряет свои генетические признаки и в результате трансформации в процессе сельскохозяйственного использования образуется новый тип почвы – органоминеральная.

В зависимости от глубины торфа до осушения, его вида и состояния этот период в зависимости от характера сельскохозяйственного использования достигается через 10-20 лет при средней глубине торфа до осушения 50 см и через 60-100 лет при средней глубине торфа до осушения 100 см.

### **Выводы**

1. На основании многолетних данных инструментальных наблюдений на опытных площадках, оборудованных осадочными марками, установлены закономерности деформирования (снижение толщины) отдельных слоев торфа по глубине залежи после осушения.

2. В первый год после осушения величина осадки торфа зависит в основном от физико-механических факторов, определяющих процесс деформирования, который аналогичен компрессионному уплотнению. Влияние других факторов на данном этапе несопоставимо мало в сравнении с влиянием физико-механических факторов. Осадку торфа через год после осушения предложено рассчитывать как сумму деформаций компрессионного уплотнения отдельных слоев торфа в залежи.

3. Установлена закономерность изменения по глубине залежи уплотняющей нагрузки, по которой рассчитываются деформации компрессионного уплотнения отдельных слоев и общая осадка поверхности залежи через год после осушения.

4. Получены эмпирические формулы, позволяющие по показателям физических свойств каждого вида торфа в залежи до осушения (по данным инженерно-геологических изысканий, выполненных до осушения) и рассчитанной величине осадки через год после осушения прогнозировать снижение толщины отдельных слоев на любой момент времени и осадку поверхности залежи при различном характере сельскохозяйственного использования осушенного торфа.

**Литература**

1. Пособие к строительным нормам Республики Беларусь П1-03 к СНБ1.02.01-96 Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания для мелиоративного и водохозяйственного строительства. – Мн. – 2004. – 56 с.

**Summary**

***Chernik P., Aziava G., Roudoy O., Slagada R. Research of the Peat Deformation and Working out During the Process of Agricultural Utilization***

On the basis of the long-term data of instrumental observations the regularities of thickness reduction of an individual peat layer at the deposit depth after the reclamation were determined at the trial plots. The empirical dependences which allow, by the indices of physical properties of each kind of peat in the deposit before the reclamation (by the data of geological engineering surveys made before the reclamation), to predict the decrease of individual peat layers on any date after the reclamation, as well as the deposit surface deformation depending on the character of agricultural utilization of the peat dried out.

*Поступила 6 декабря 2006 г.*