

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Отделение биологических наук  
Институт лесоведения РАН

**СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ ЛЕСОВ  
ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ**

Товарищество научных изданий КМК

Москва ❖ 2009

## 1.2. Влияние современного климата на болотообразование и гидролесомелиорацию

С.Э. Вомперский

Как известно, методы лесоводства, включая методы повышения продуктивности избыточно увлажненных лесов и лесных болот, прямо зависят от климатических условий, в которых они применяются. Эффективность гидролесомелиорации в бореальной зоне при движении на север значительно падает (Heikurainen, 1960; Пятецкий, 1963), как и продуктивность естественно дренированных лесов. Точно так же хорошо известны обусловленные климатической тепло-влажнообеспеченностью зональные различия в распространенности болот на плакорах, различия в типологических характеристиках болот, скорости торфонакопления, обводненности, водно-физические свойства торфов и т.д. Иначе говоря, болотообразовательные процессы, сама потребность в гидролесомелиорации, как и ее методы, в значительной мере обусловлены климатом конкретных осушаемых территорий.

Теперь, когда факт современного быстрого изменения климата стал общеизвестным, оставшиеся с середины и второй половины прошлого века неизменными инструкции и нормативы проектирования гидролесомелиораций (Технические указания ..., 1971; Нормативы ..., 1977; и др.) нуждаются в анализе и пересмотре. Кроме того, появление новых требований к землепользованию и ведению лесного хозяйства таких, как учет эмиссий парниковых газов, а также решение «устойчивого природопользования» и сертификации способов лесохозяйственных работ полностью относятся к гидролесомелиорации. Эти новые требования вытекают из решения Генеральной ассамблеи ООН по окружающей среде и развитию (1988), Рамочной конвенции ООН по изменению климата (1992), Киотского протокола (1997) и других международных форумов, которые Российская Федерация ратифицировала в числе большинства стран мира. Перечисленные выше проблемы далеки от ясности и научного обоснования новых оптимальных методов гидролесомелиорации. Более того, возможная реакция естественных болот на потепление климата остается дискуссионной и стала предметом бесчисленных зарубежных публикаций с неоднозначными взглядами, нашедшими отражение, в частности, в компиляциях и сводках ряда изданий, трудах конгрессов по торфу и т.п. (Joosten, Clarke, 2002; After Wise Use ..., 2008; Strack *et al.*, 2008; и др.). К сожалению, по ряду объективных причин эта тематика в оте-

чественной литературе представлена крайне скромно, несмотря на обилие девственных болот (куда едут иностранные ученые со своим оборудованием) и значительные площади мелиорированных в недалеком прошлом болот.

В настоящей работе мы пытаемся обсудить совокупность научных задач, стоящих перед лесным болотоведением и гидромелиорацией, подвергнув краткому анализу следующие вопросы:

- современное изменение климата, его влияние на болотообразование;
- оценка эмиссий метана и баланса углерода болот;
- нормативы гидроресомелиорации, нуждающиеся в анализе или пересмотре.

**Современное изменение климата, его влияние на болотообразование.** В данном разделе мы сделаем очень краткое извлечение из четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК<sup>1</sup>), его рабочей группы I («Изменение климата – 2007: научно-физическая основа»). Мы коснемся преимущественно вопросов, прямо относящихся к изменению климата континентов средних и северных широт северного полушария, имеющих значение для лесного хозяйства России. Данные четвертого доклада МГЭИК (Изменение климата ..., 2007) – наиболее новый официальный источник обобщенных современных знаний о состоянии климата. Мы обсудим возможные следствия изменения климата для процессов болотообразования, а также лесоосушения и подходы к натурной проверке этих следствий.

Как следует из рис. 1, среднегодовые глобальные приземные температуры, существенно колеблясь, неуклонно росли в течение последних 150 лет. Столетний линейный тренд составил 0,74°C (1906–2005 гг.). Особенно быстрое потепление произошло примерно с 1950 г., что связывается с мировым ростом индустриализации после второй мировой войны. Несколько цитат из упомянутого доклада МГЭИК:

«Темпы потепления, усредненные за последние 50 лет ( $0,13 \pm 0,03^\circ\text{C}$  за десятилетие), почти вдвое выше, чем за последние 100 лет ((Изменение климата ..., 2007, с. 38).

---

<sup>1</sup> МГЭИК учрежден в 1988 г. Всемирной метеорологической организацией и Программой по окружающей среде ООН для подготовки регулярно обновляемых обобщений научных знаний по состоянию климата. В работе МГЭИК принимают участие сотни ведущих специалистов из разных стран.

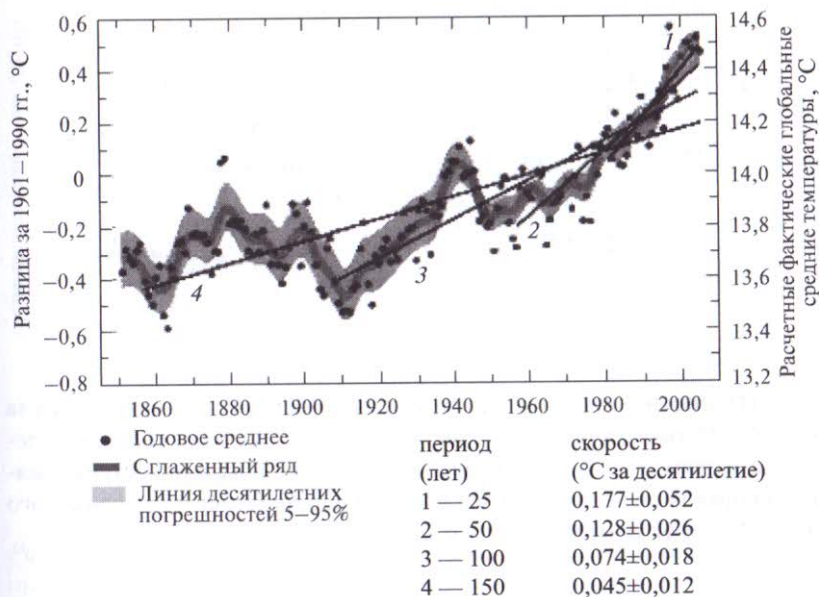


Рис. 1. Глобальная средняя приземная температура (по данным Четвертого оценочного доклада МГЭИК, Изменение климата..., 2007).

«Одиннадцать из двенадцати последних лет (1995–2006) попали в число 12 самых теплых лет по результатам измерений глобальной температуры (с 1850 г.) (Там же, с. 5).

«Средние температуры в северном полушарии во второй половине XX века были..., вероятно, самыми высокими, по крайней мере, за прошедшие 1300 лет» (Там же, с. 10).

Глобальные показатели, конечно, являются очень обобщенными характеристиками; пространственные и внутригодовые различия в климате очень велики, прежде всего, между крупными частями земного шара. «В обоих полушариях приземные температуры над сухопутными регионами повышались более высокими темпами..., чем над океаном за последние десятилетия... (около  $0,27\text{ °С}$  против  $0,13\text{ °С}$  за десятилетие)... Самое сильное потепление имеет место в северном полушарии зимой (декабрь – февраль) и весной (март – май)» (Там же, с. 39).

Дискуссионность причин глобального потепления климата согласно четвертому докладу МГЭИК значительно уменьшилась. Главная причина – рост концентрации в воздухе парниковых газов. Влияние увеличения солнечного излучения на глобальное среднее радиационное воздействие признано дающим значительно меньший вклад

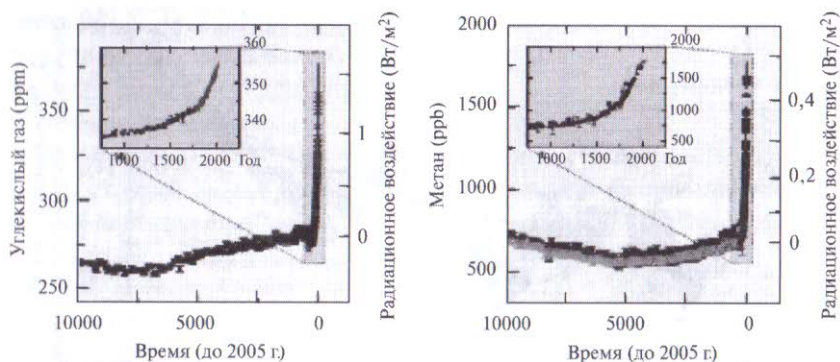


Рис. 2. Изменение концентрации углекислого газа и метана по данным за последние 10 тыс. лет (большие панели) и с 1750 г. (врезки). Измерения сделаны по кернам льда. Соответствующие радиационные воздействия показаны на правой оси больших панелей (по данным Четвертого оценочного доклада МГЭИК, Изменение климата..., 2007).

( $+0,12 \text{ Вт м}^{-2}$ ), чем роста концентраций парниковых газов ( $+2,30 \text{ Вт м}^{-2}$ ). Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере с доиндустриального уровня в 280 ppm выросло до 379 ppm в 2005 г. (рис. 2),  $\text{CH}_4$  – более чем вдвое, до 1774 ppb,  $\text{N}_2\text{O}$  – на 18%, до 319 ppb. Главный вклад в радиационный эффект дает  $\text{CO}_2$  ( $1,66 \pm 0,17 \text{ Вт м}^{-2}$ ), затем  $\text{CH}_4$  ( $0,48 \pm 0,05 \text{ Вт м}^{-2}$ ) и  $\text{N}_2\text{O}$  ( $0,16 \pm 0,02 \text{ Вт м}^{-2}$ ). Хотя резкий рост концентрации  $\text{CH}_4$  за последние полвека нельзя объяснить иначе, чем антропогенной деятельностью, некоторые исследователи еще продолжают связывать возможную глобальную недооценку главного естественного источника метана – водно-болотных угодий. Этот вопрос кратко обсуждается в следующем разделе статьи.

Согласно моделированию приземного потепления, в ближайшем будущем – до 2030 г. (по сравнению с 1980–1999 гг.) лучшие оценки для ряда сценариев выбросов парниковых газов дали очень близкие диапазоны роста:  $0,649\text{--}0,690 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3). К концу XXI в. глобальное потепление по разным сценариям даст увеличение на 1,8 до  $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Даже если антропогенные выбросы парниковых газов (от сжигания топлива, изменения землепользования и др.) останутся на уровне XX в., инерция роста глобальных температур продолжалась бы, увеличившись к концу XXI в. на  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следует заметить, что «для каждого из континентальных регионов проецируемое потепление за 2000–2050 гг. сильнее, чем глобальное среднее, и сильнее, чем наблюдаемое потепление за прошлое столетие» (Изменение климата ..., 2007, с. 82). Можно

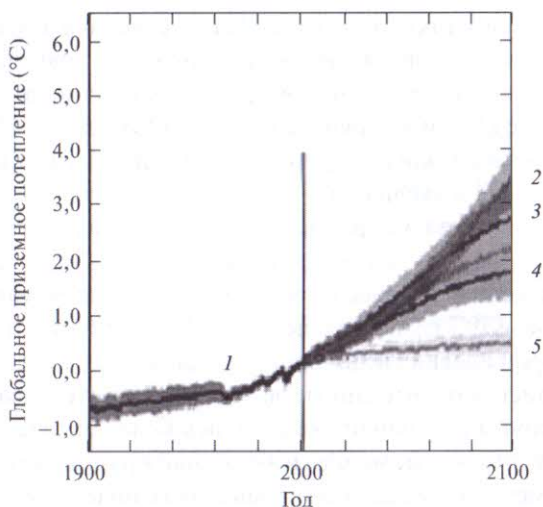


Рис. 3. Многомодельные средние значения (МСЗ) и оцениваемые диапазоны приземного потепления для разных сценариев выбросов парниковых газов: 1 – МСЗ, 2, 3, 4 – оценки по разным сценариям, 5 – оценка при постоянной концентрации на уровне 2000 г. (по данным Четвертого оценочного доклада МГЭИК, Изменение климата ..., 2007).

предполагать, что в Европейской части России, где сосредоточены перспективные для лесосошения болота, потепление относительно 2000 г. может достигать 3–4 °С.

Значительно менее точные оценки изменений как наблюдавшихся в XX в., так и проецируемых на XXI в. относятся к осадкам. Недостаточная сеть их измерений, дискретность по пространству, низкая точность и разная методика в разные периоды времени (в частности, в России) измерений осадков (особенно зимних) – главные источники ряда неопределенностей (Сабо и др., 1981). Тем не менее, в докладе отмечается «значительный рост количества осадков в... северной части Европы, северной и центральной частях Азии... Количество осадков разнится в пространстве и времени...» (Изменение климата ..., 2007, с. 8). Основными причинами изменения количества и времени выпадения осадков являются повышение содержания водяного пара в атмосфере (усиление испарения) и активизация крупномасштабной глобальной циркуляции тепло-влажнопотоков. «Возросшая сила западных ветров в северном полушарии изменяет поток тепла от океанов к континентам, являясь одним из основных факторов наблюдаемых зимних изменений в траекториях циклонов... осадков и температуры в сред-

них и высоких широтах» (Там же, с. 40). В связи с этим «...вероятность выпадения осадков в виде дождя, а не снега повышается, особенно осенью и весной в начале и конце снежного сезона... особенно над сушей в средних и высоких широтах» (Там же, с. 119). Таким образом, длина бесснежного периода (с положительными температурами) вырастет, как и увеличение стока в зимние оттепели. Возрастут также периоды, частота экстремальных контрастных явлений (волны тепла, периодов длительных осадков, засух и т.п.). Характер изменения осадков сложный. Согласно российским исследованиям, летние осадки за 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг. на большей части территории России увеличились от 0 до 40 мм (за июнь – август) или уменьшились, хотя эти данные весьма приблизительные. Годовые осадки в подобном сравнении увеличились более определенно, хотя авторы считают, что разные методы наблюдений в разные периоды могли привести к «смещенным оценкам изменения годовых сумм осадков, а именно к завышению трендов» (Семенов и др., 2006).

В какой же мере вышеприведенные краткие представления о современном и будущем глобальном изменении климата дают основания для прогноза процессов болотообразования и прикладного их использования в лесоводстве и гидролесомелиорации? Ценность этой информации – прежде всего в возможности сделать самые общие предположения по развитию болотообразовательных процессов и в ориентации планирования разнообразных природоведческих научных исследований. К сожалению, непосредственно применить данные глобальной динамики климата для корректировок ряда нормативов практического лесного хозяйства и гидромелиорации пока нельзя.

Главное препятствие заключается в том, что, как подчеркивается в Четвертом докладе МГЭИК, изменчивость показателей климата резко увеличивается с уменьшением пространственно-временного масштаба менее континентального и менее 50 лет. Причины этого явления пока неясны, хотя и отмечается недостаток информации для мелкомасштабных особенностей климата, среди которых и топографическая неоднородность территории. Противоречивы и данные по источникам и эмиссиям метана. Но землепользование организуется на площадях принципиально меньших, чем континент. Именно к сравнительно однородным условиям адресуются адекватные методы лесоводства. Важен и временной масштаб. Гидролесомелиорация, например, в безремонтном содержании сети предполагает повторное ее восстановление примерно через три десятилетия. В эти первые десятилетия идут кардинальные перестройки болотных биогеоценозов в лесные, и каков будет климат в

Таблица 1. Возможное влияние потепления климата на процессы болотообразования

Изменение границ и площадей болот и заболоченных земель	1. Оттаивание почв зоны вечной мерзлоты. Распространение процессов болотообразования или уменьшение их (в зависимости от дренажа, влияния термо-карстовых озер)
	2. Смещение к северу северной, а возможно и южной границ распространения верховых болот
	3. Изменение площадей мелкоотрфованных земель начального или неустойчивого заболачивания
Изменение типов биогеоценозов (фаций) болотных массивов	1. Увеличение облесенности олиго- и мезотрофных болот, улучшение роста болотных древостоев
	2. Уменьшение площадей мочажинных типов, увеличение кустарничково-сфагновых типов в южной части распространения верховых болот
Изменение скорости торфонакопления, суммарного газообмена и радиационного влияния	1. Возможно изменение первичной продуктивности болот
	2. Усиление деструкции поверхностных слоев торфа, выделения CO <sub>2</sub> при понижении уровня болотных вод и ослабление эмиссии CH <sub>4</sub>
	3. Увеличение выделения метана при таянии вечно мерзлых торфяников
	4. Изменение нетто-экосистемной продукции болотных биогеоценозов

каждое из этих десятилетий, имеет важное значение. Но глобальные прогнозы изменения температур приземных слоев воздуха и, особенно, осадков, как отмечено выше, могут сильно отличаться от континентальных и, тем более, от мелкомасштабных внутриконтинентальных. Из этого следует, что лесосушение нуждается в хорошем гидрометеорологическом обеспечении, т.е. в данных более плотной сети метеопостов на природно сходных, сравнительно небольших территориях.

Одновременный рост температур воздуха (следовательно, испарения) и осадков создают неопределенность в итоговом балансе почвенной влаги и меры ее избытка. Для регионов, где расходы влаги на испарение превысят увеличившиеся (или неизменные) осадки, возможные следствия для болот приведены в табл. 1. Например, в случае уменьшения влагообеспеченности мелкоотторфованные объекты неустойчивого соотношения процессов заболачивания – разболачивания перейдут в категорию типов леса, не нуждающихся в гидромелиорации. Если же по тем или иным природным районам избыток влаги не изменится, то ранее причисленные к объектам мелиорации площади сохранятся в гидроресомелиоративном фонде.

Важным индикатором изменения условий болотообразования являются южная и северная граница распространения верховых болот. Сохраняющиеся теперь в Западной Сибири, в лесостепной зоне Барабинской низменности верховые сосновые кустарничково-сфагновые болота – рямы – характерный пример. В Европейской части граница распространения болот проходит вблизи пунктов: Березняки, Вятка, Вологда, Тверь, Витебск. Исчезновение по границам распространения верховых болот, их естественное превращение в лесные биогеоценозы на торфяниках, если это уже происходит или произойдет, служит признаком ксерофитизации климата в этих регионах.

Показателями уменьшения увлажненности климата в зоне избыточного увлажнения могут служить и сукцессии растительности ombрофных частей на «вершинах» олиготрофных болот, получающих влагу только из атмосферы. Согласно В.В. Романову (1961), меньше других расходуют влагу на суммарное испарение кустарничково-сфагновые болота, а больше других типов верховых – грядово-мочажинные. Следовательно, первым признаком уменьшения увлажненности следует считать внутриволотные сукцессии и исчезновение мочажинных типов болотных биогеоценозов (фаций, ассоциаций) верховых болот либо, наоборот, увеличение их площадей при росте степени избытка влаги.

В средствах массовой информации (СМИ) и общественном сознании современное изменение климата, связанное с ростом concentra-

ций парниковых газов, ассоциируется главным образом с его «потеплением» (увеличением засушливости аридных регионов, таянием ледников, поднятием уровня моря и т.д.). Меньше известно ученым и говорится в СМИ об изменении осадков. Но для задач растениеводства (лесоводства) одно «потепление» без учета связанного с ним водного режима (даже без изменения нормы осадков) не может рассматриваться экологически исчерпывающе. Для этого необходимо знание теплового и водного балансов конкретной территории – объекта управления. Расходу тепла на эвапотранспирацию или количеству воды в этих балансах соответственно принадлежит главное место. Поэтому важно знать, как меняется получаемая биогеоценозом энергия – радиационный баланс (остаточная радиация), испарение, влагозапасы почвы, а не только температура приземного воздуха, данные о которых в глобальном масштабе наиболее обоснованы в докладе МГЭИК.

Связь водного и теплового баланса издавна интересовала как российских (В.В. Докучаев, Г.Ф. Высоцкий, А.А. Григорьев и др.), так и европейских ученых, и в качестве одного из ее поздних выражений может служить уравнение М.И. Будыко (1977):

$$E/r = \Phi (R/Lr),$$

где  $E$  – суммарное испарение,  $r$  – осадки,  $R$  – радиационный баланс,  $L$  – скрытая теплота испарения.

Как известно, общим зональным показателем качества климата является тепло-влажностность, выражаемая радиационным индексом сухости (влажности)  $R/Lr$  – отношения остаточной радиации (или радиационного баланса) к затратам тепла на испарение осадков. Как подчеркивал М.И. Будыко (1977), для меньших, чем зона, площадей важен не только этот относительный показатель, но и абсолютные значения членов теплового и водного баланса того или иного региона или участка суши. К сожалению, наблюдений на метеопостах радиационного баланса было мало и в прошлом, а в период после 1995 г. их стало еще меньше. Процессы болотообразования прямо регулируются избыточным увлажнением. Поэтому лучше всего было бы знать все водно-тепловые характеристики даже не по измерениям на стандартных метеостанциях, а в конкретных местопроизрастаниях (поле, лес, болото и т.д.), где необходимо оптимизировать водно-тепловой баланс.

Согласно В.В. Романову (1961), для болот связь суммарного испарения и радиационного баланса выражается прямолинейной зависимостью, которая с очень небольшой погрешностью может выражаться уравнением  $E = \alpha R$ , где  $E$  – эвапотранспирация,  $R$  – радиационный баланс,  $\alpha$  – величина затрат энергии на удельное испарение. Взаимо-



связь всех членов уравнений теплового и водного баланса отражается глубиной уровня почвенно-грунтовых вод (УПГВ). Это означает, что изменение увлажненности местопроизрастаний является функцией как обилия осадков, так и суммарного испарения. Сток, конечно, важнейший элемент баланса, но он также зависит от УПГВ и фильтрационных свойств почвы. Таким образом, располагая увеличением глобальных или континентальных температур воздуха и даже изменением осадков, определить в меньшем масштабе изменение УПГВ, условий формирования первичной продукции либо сукцессий, как и скорости деструкции опада, весьма трудно.

Без прямых стационарных – в натуре – наблюдений, прежде всего за УПГВ на естественных и различно осушенных болотах, нельзя надежно утверждать, способствует ли в конкретном регионе современный климат процессам разболачивания или усиления болотообразования. Кроме того, конечно, необходим ряд других наблюдений: за сукцессиями растительности, современной скоростью торфонакопления, сезонной и межгодовой динамикой роста древостоев, режимом стока воды и т.п. Потенциальную ценность представляют болота – объекты длительных гидрологических исследований, в частности Ламмин-Суо, Шириновское и др. на опытных станциях Ленинградского гидрологического института в Ленинградской обл. в 50–60-е годы прошлого века (Иванов, 1953; Романов, 1961). На ряде стационаров Института лесоведения РАН – в Тосненском лесхозе Ленинградской обл. (1960–1970-е гг.) и в Тверской обл. (1974–1984 гг.) велись наблюдения за стоком и водным балансом осушенных лесных болот. Подобные наблюдения в Тосненском лесхозе велись также и сотрудниками Санкт-Петербургской лесотехнической академии. В случае их восстановления появляется возможность обоснованно ответить на вопрос, как изменились условия формирования водного баланса осушенных болотных местопроизрастаний в «новом» климате. Разумеется, фактический материал прошлых стационарных исследований водного режима конкретных болот может иметься и в других учреждениях страны или у отдельных исследователей. Однако во всех случаях сохранность натуральных объектов и, тем более, изменившаяся растительность требуют в исследованиях такого рода специального учета.

Важным фактором, регулирующим обратную связь изменения климата, является реакция биоты на потепление климата и увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  воздуха. В четвертом докладе МГЭИК (Изменение климата ..., 2007) отмечается неудовлетворительное понимание этой реакции. В конечном счете, данный вопрос может оказаться самым важ-

ным. С одной стороны, средообразующий «ответ» биоты может усиливать либо, наоборот, ослаблять степень потепления климата. С другой, изменение типологического разнообразия экосистем, продуктивности угодий, изменение границ природных зон влияет на сырьевые возможности существования людей и удовлетворения социальных потребностей. Однако ответ на этот вопрос требует знаний функциональной биогеоценологии, пока еще во всем мире слабо разработанной. Что касается болотных экосистем, можно отметить, что по некоторым данным первичная продукция (NPP) болотных фитоценозов не так влияет на величину торфонакопления (NEP), как скорость деструкции растительного опада и разложение торфа в зоне аэрации. Однако пока даже на качественном уровне трудно определенно судить о влиянии следствий изменения климата на процессы болотообразования.

**Об оценках эмиссий метана и баланса углерода болот.** Как известно, центральное место в функционировании любых наземных экосистем принадлежит синтезу, удержанию и разложению органического вещества. Общим показателем функционирования биогеоценоза является запас и динамика углерода в его надземной и подземной частях. Энергетическое воздействие экосистем определяется также их биофизическими характеристиками (альbedo, затратами тепла на испарение и др.), радиационным воздействием через количество и формы газообразных органических соединений, связываемых и выделяемых экосистемами. Количественные характеристики функционирования биогеоценозов являются определяющими для понимания самих природных различий биогеоценозов (Сукачев, 1957), их реакции на изменение климата и антропогенные воздействия. Острый недостаток и актуальность таких знаний в отношении болот послужили причиной серьезного внимания к ним за рубежом, хотя большие методические трудности экспериментального определения важнейших составляющих круговорота веществ экосистем разного объема пока не преодолены (Вомперский, 2008). Отличительной функциональной особенностью болотных экосистем от других является заторможенность гетеротрофного разложения детрита из-за анаэробных условий, накопление его в виде торфа и выделение газообразных продуктов, в частности метана, закиси азота и других не полностью окисленных продуктов.

Фиксируемые в срочных, натуральных наблюдениях потоки обмена веществ болот показали их очень большую пространственно-временную изменчивость и обычную нерепрезентативность, недостаточную точность наблюдений, как и создаваемых на их основе моделей. Такое

положение нередко провоцирует ученых на предпочтение в качестве «средних» то одних, то других значений данных, отражая принадлежность исследователей к разным организациям и источникам финансирования научных проектов (гидролесомелиоративных, охраны и заповедания болот, разработки торфяников для энергетических и других целей и т.п.).

В подавляющем большинстве замыкающие баланс углерода болот данные, репрезентативные по времени для того или иного пространства, отсутствуют, что, по существу, не дает обоснованной возможности правильно оценить роль болот, в частности радиационную функцию естественных и мелиорированных болот. Это относится к потокам метана, вариация которого в болотах разного типа велика. Например, в центральной Канаде (Онтарио) в среднем за сезон (150 дн.) в разных типах эмиссировалось от 0,06 до 10 г  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  (Bubier *et al.*, 1993). Как следует из некоторых других, значительно больших, оценок выделения метана, он может оказаться еще и существенной статьей собственно углеродного баланса биогеоценоза. Мы уже делали в свое время (Вомперский, 1994) обзор литературных сведений о круговороте углерода болотных экосистем. И хотя после этого появилось очень много публикаций по газообмену болот, но ясности и надежности суждений не добавилось. В Четвертом докладе МГЭИК подчеркивается неясность количественной оценки источников природной эмиссии  $\text{CH}_4$ , необъяснимость причин резкого увеличения ее скорости в 1960–1999 гг. (в 6 раз больше, чем в любой 40-летний период до 1980 г.). Предполагают, что в этом, как и в колебаниях по годам выделения  $\text{CH}_4$  наземными экосистемами, «виноваты» водно-болотные угодья. Здесь мы приведем некоторые примеры контрастных оценок выделения метана болотными экосистемами.

В Швеции все болота (торф > 30 см) классифицируются восемью типами, и лишь четыре из них (38% площади болот) отнесены к эмиссирующим метан (Mikkela, 1997; Grandberg *et al.*, 2007), это преимущественно безлесные болота. Репрезентативными по всем природным зонам и типам болот исследованиями в 1994 г. выявлено, что поток метана (за время с температурой воздуха не ниже +3 °C) с эмиссирующих болот четырех типов составил 0,29 Tg  $\text{CH}_4$  (Mikkela *et al.*, 1999), или 11,8 г  $\text{CH}_4 \text{ г м}^{-2}$  за теплый период. Если же отнести этот поток на площадь всех восьми типов болот Швеции, то средняя расчетная эмиссия окажется 4,48 г  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2}$  за сезон. Примерно такая же годовая эмиссия  $\text{CH}_4$  из бореальных болот принималась E. Gorham (1991) и выявлена N.T. Roulet *et al.* (2006). В соседней Финляндии в расчет для всех

неосушенных болот принималось в 3 раза большее значение: 13,51 г  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$  (Crill *et al.*, 2000). Согласно этому источнику, величина выноса C в метановом газообмене экосистем составляет 50% от накапливаемого углерода, изымаемого из атмосферы (нетто-системной продукции – NEP). Между тем, по многолетним (с микрометеорологическим обеспечением) наблюдениям на олиготрофном болоте в Канаде масса углерода, эмиссируемого с метаном, составляла только 9% от связываемого в форме  $\text{CO}_2$  из атмосферы и отлагаемого растущим торфяником (Roulet *et al.*, 2006). Примерно такого же порядка оценки в углеродном балансе эмиссии  $\text{CH}_4$  в более ранних работах давались в расчете от нетто-первичной продукции (NPP): 0,5 или 2–7% (Aselman, Crutzen, 1989; Brown *et al.*, 1989), о чем прежде мы говорили (Вомперский, 1994). Поэтому, согласно финским расчетам, получается, что ликвидация большой эмиссии  $\text{CH}_4$  при гидромелиорации очень сильно сокращает радиационное влияние естественных болот и анаэробные потери органического вещества в пользу гидромелиорации (Minkinen *et al.*, 2002).

В России, хотя и меньше, но также делалось немало попыток определить эмиссию метана из болот, особенно в Западно-Сибирской низменности. Приведем некоторые оценки.

Так, летом 1993 г. на олиготрофном болоте Бокчарское в Томской обл. по камерным наблюдениям регистрировались очень большие эмиссии: 144–323 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ; в 1994 г. 5,2 мг  $\text{C м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , по измерениям с самолета в августе 34–146 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ , утренние измерения (юго-западнее пос. Плотниково) – 0,1 г  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ ; в 1995 г. в разных ассоциациях 3,7–18,1 мг  $\text{C м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ; в 1997 г. 4,1–4,4 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . В 1999 г. на мезотрофных участках того же Бокчарского болота – 12,7 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ; а на олиготрофных – только 2,1 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ; в 2000 г. в разных растительных ассоциациях средняя эмиссия метана оценивалась в 1,22 мг  $\text{C м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  (Inoue *et al.*, 1997; Глаголев и др., 2007, Naumov *et al.*, 2007). Согласно тем же источникам, вблизи Ханты-Мансийска (средняя тайга) по измерениям с самолета поток метана в 1993 и 1994 гг. составлял 2,3–3,1 мг  $\text{C м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , вблизи Ноябрьска (лесотундра) по камерным определениям в июле–сентябре 1994 г. потери метана составляли в среднем 0,57 мг  $\text{C м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . A. Naumov (2001), A. Naumov *et al.* (2007) оценили камерным методом среднелетнюю эмиссию  $\text{CH}_4$  в 2004–2006 гг. в 81,6 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  из болот в средней тайге (около Ханты-Мансийска), а в лесотундре в 6–41 мг  $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ . Конечно, разнообразие типов болот, погодных условий разных лет и особенно дискретность измеряемого варьирующего потока крайне затрудняют

экстраполяцию данных на год и на большие площади.

По наблюдениям ряда лет с использованием камерного метода, в Тверской обл. на Западнодвинском лесоболотном стационаре сотрудниками Института лесоведения РАН (Вомперский и др., 2000) были получены результаты, приведенные в табл. 2. Усредненный по площади (с учетом роли нанорельефа) вынос метана (в пересчете на углерод) в среднем за вегетационный период (май–октябрь, 184 дня) оказался в олиготрофном грядово-мочажинном болоте 4,02 г С м<sup>-2</sup>, а в черноольховом болоте с глубоким торфом на порядок меньше – 0,44 г С м<sup>-2</sup>.

Величину годичной эмиссии углерода (СН<sub>4</sub>) порядка 4–5 г СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>, по-видимому, можно считать близкой к среднему для олиготрофных и мезо-олиготрофных бореальных болот. В сводке M. Strack *et al.* (2008) преобладают оценки потока метана порядка 2–6 г СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> с предельным в некоторых случаях верхним интервалом до 31–40 г СН<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>. Что касается встречающихся в литературе неэпизоди-

Таблица 2. Эмиссия метана по систематическим наблюдениям за май–октябрь 1993–1998 гг. (камерный метод с использованием газового хроматографа «Хром-5»).

Элементы нанорельефа	Олиготрофный грядово-мочажинный комплекс		Евтрофный черноольшаник крупнотравно-папоротниковый	
	площадь, %	мг С м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup> , в среднем	площадь, %	мг С м <sup>-2</sup> ч <sup>-1</sup> , в среднем
Микроповышения	20	0,0004	17	0,000
Средняя поверхность	30	0,903	68	0,097
Микропонижения	50	1,433	12	0,358
Протоки	–	–	3	0,299
Эмиссия метана, средневзвешенная за сезон (184 сут.), г С м <sup>-2</sup>	4,02		0,44	

ческих очень высоких оценок, то к ним следует относиться с осторожностью. Например, если принять в качестве репрезентативной эмиссию метана Васюганскими болотами Западно-Сибирской низменности по Н.С. Паникову (1995) – среднее из двух сезонов – 21,3 мг С м<sup>-2</sup> ч<sup>-1</sup> (за теплый период) или порядка 93–187 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> (за целый год), то с учетом других расходных статей углеродного баланса такие болота либо должны иметь невероятную первичную продуктивность, либо их торфяники уже исчезли бы. Необходимо замыкание углеродного баланса болотного биогеоценоза. К таким работам относятся упоминавшиеся выше круглогодичные исследования в течение 6 лет на олиготрофном болоте в Канаде, где, в частности, установлено, что с метаном эмиссировалось 3,7 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>.

Кроме отмеченных трудностей с определением выноса углерода в форме метана, непросто обстоит дело с оценкой количества вымываемого углерода в растворенном виде со стоком: например, последний из болот умеренной зоны может колебаться от 1,0 до 50,0 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> (Dillon, Molot, 1997). Прямое измерение объема стока воды и содержащегося в нем органического вещества из конкретного участка болота, покрываемого наблюдениями за балансом углерода, делается исключительно редко. Это трудоемкая специальная задача, имеющая свои трудности и слабости относительно методов и точности оценок. В Канаде, например, одно и то же олиготрофное болото около Оттавы исследовалось и дважды оценивалось очень близким составом исследователей. В замыкании углеродного баланса на вымывание растворенного углерода вместе с эмиссией метана в одном случае отводилось 10 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> (Moore *et al.*, 2002), в другом при наблюдении за стоком и гидрохимией только на вымывание – 14,9 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>, а вместе с метаном – 18,6 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> (Roulet *et al.*, 2006). Различия существенны, если на нетто-накопление углерода болотом в последнем случае оставалось 21,5±3,9 г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>. Эти, по существу, передовые исследования в данной области знания показывают, сколь не проста задача действительной оценки современного баланса углерода экосистем болот.

Поскольку естественные болота находятся в разных сукцессионных стадиях, с учетом возраста, географического положения, конкретных условий развития и т.п., то их современный прирост и возможная реакция на изменение климата должны быть разными. В частности, в одном из последних обобщений (Mäkkilä, Saarnisto, 2008) приводятся соответствующие оценки средней в течение последних 200 лет аккумуляции углерода поверхностным слоем торфяников. Эти авторы считают, что северные аапа болота Финляндии имеют отрицательный баланс уг-

лерода. Их прирост не покрывает суммарного разложения всей залежи, и такие болота являются эмиссионерами парниковых газов. Между тем, на их долю приходится значительная часть болот страны.

Вообще, многолетний кризис в методологии экспериментального определения потоков и баланса круговорота веществ и энергии биогеоценозов (Вомперский, 2006) логично связывается с попытками его преодолеть с помощью методов математического моделирования. Но успех последних зависит от надежности и репрезентативности исходных данных функционирования экосистем, знания количественных отношений с факторами, их обуславливающими. Пока таких данных нет. Вот почему мы надеемся на перспективность более простого подхода – оценку баланса углерода болот посредством определения скорости накопления торфа за последние 20–40 лет (Вомперский и др., 2007), сопровождаемой учетом эмиссии углерода из более глубоких слоев.

Без знания оценок современного баланса углерода болот нельзя судить о радиационных следствиях изменения климата в их функционировании, а также правильно определить место и методы гидромелиорации в рациональном природопользовании.

**О нормативах гидролесомелиорации, нуждающихся в новом анализе.** Все существующие рекомендации по интенсивности гидролесомелиорации основаны на некоторых в прошлом натуральных наблюдениях (обычно в течение нескольких лет) за связью нормы осушения или продуктивности древостоев – классов бонитета, а в лучшем случае – приростов стволовой древесины с параметрами осушительной сети (Елпатьевский, 1957; Сабо, 1966; Буш, 1970; Вомперский и др., 1988). Причем каждый исследователь априори исходил из покрытия периодом своих наблюдений «характерной» тепловлагообеспеченности климата и соответственно репрезентативного выявления типичного водного режима, мелиоративного действия конкретных конструкций осушительных систем. Накладывают новые требования «устойчивого природопользования» более сложные задачи учета следствий лесосушения, в том числе минимизации выбросов тепличных газов.

Изменившийся и продолжающийся меняться климат: тепло- и влагообеспеченность, увеличение периода вегетации, суммы положительных температур, могут влиять на:

- классификацию объектов лесосушения, представленность площадей разных типов леса, потенциально подлежащих мелиорации; вероятно, их количество по разным регионам будет изменяться по сравнению с планами 60-х годов прошлого века;

- применяемые параметры лесной мелиоративной сети, особенно регулирующей;

- «зональные», «поправочные» коэффициенты на расстояния между осушителями регулирующей сети в различных районах (Писарьков, Тимофеев, 1964; Сабо и др., 1981);

- различные пересчетные коэффициенты текущего прироста мелиорированных лесов в разных областях, коэффициенты «приведения» таксационных характеристик, рекомендованных к использованию при проектировании гидромелиорации;

- дополнительный за счет мелиорации прирост стволовой древесины в разных типах лесных болот, как и все полезности – эффективности осушения в традиционном понимании.

Оправдана ли вообще вся эта система коэффициентов, пересчетов параметров сети и эффективности осушения, учитывая накопленный отечественный опыт, а также иные на этот счет выводы финских специалистов (Heikurainen, 1960; Seppälä, 1972)?

Другой важной научной задачей стала необходимость оценивать эффективность лесосушения, его следствий в количественном изменении статей баланса углерода мелиорируемых болот, имея в виду также газообмен их с атмосферой. Необходимы оценки нетто-первичной продукции (NPP) в органической массе (соответственно в углероде) и нетто-экосистемной продукции (NEP), характеризующей баланс вещества в биогеоценозе до и после осушения почвы. Эта задача также согласуется с решением Генеральной ассамблеи ООН (Нью-Йорк, 1997) об «устойчивом развитии», направленном на экологизацию природопользования, а также биогеоценотический подход к обоснованию гидролесомелиораций (Вомперский, 1994, 2008).

Здесь требуется иная методология, чем оперирование с кубическими метрами дополнительного после мелиорации прироста стволовой древесины и изменением состава древостоев, на которых ориентирована российская гидролесомелиоративная практика (Сабо и др., 1981). Да и современное разнообразное промышленное использование древесной массы, в т.ч. для получения этанола, нуждается именно в оценках прироста лесного органического вещества как воспроизводимого заменителя нефтяного сырья.

Изучение влияния гидромелиорации на углеродный баланс экосистем имеет ключевое теоретическое значение, о чем говорилось в предыдущем разделе. Можно ли увеличить NPP и NEP болот только регулированием водного режима? Или смена главных продуцентов и усиление круговорота веществ по-разному сказывается на этих показате-

лях? Что дают при таком подходе обычные рубки ухода в мелиорированных лесах, сокращение оборота рубок главного пользования, применение удобрений?

Можно ли уменьшить увеличение эмиссии в атмосферу тепличных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.) при интенсификации землепользования и, в частности, разных методов осушения и ведения лесного хозяйства? До сих пор мы стремились ускорить и увеличить деструкцию органических остатков растений, чтобы улучшить режим питания древостоев на торфяниках. Мы знаем пока очень мало об изменении круговорота веществ в связи с гидромелиорацией разных местопроизрастаний, и эти знания далеко не бесспорны (Laine, Minkkinen, 1996; Minkkinen, Laine, 1998; Саковец и др., 2000; Joosten, Clark, 2002; Minkkinen *et al.*, 2001; Minkkinen *et al.*, 2002; Moore *et al.*, 2002). Исследования потоков вещества и энергии – функционирования биогеоценозов – сопряжены с фундаментальными методическими трудностями определения NPP и NEP с надлежащей точностью (Вомперский, 2006). Необходимо очень дорогое оборудование и длительные дорогостоящие наблюдения. И то, и другое в условиях современной России пока нереально. Вынужденные многочисленные допущения в исследованиях такого рода сильно отражаются на выводах.

Какой должна быть гидроресомелиорация в будущем применительно к более высоким экологическим требованиям, к другому климату и к меняющимся формам собственности на земельный и лесной фонды?

Поставленные выше вопросы и назревшие научные задачи пока не имеют однозначных ответов, а состояние лесного хозяйства далеко не готово решать проблему повышения продуктивности избыточно увлажненных лесов. Теория гидроресомелиорации при ее востребованности соответственно новому времени и новым задачам нуждается в дальнейшем развитии.

\*\*\*

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОБН РАН «Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга».

## Литература

- Будыко М.И. 1977. Глобальная экология. М.: Мысль. 327 с.  
 Буш К.К. 1970. Взаимосвязь между продуктивностью древостоев и интенсивностью осушения. Вопросы гидроресомелиорации. Рига. С.101–117.

- Вомперский С.Э. 1994. Роль болот в круговороте углерода // XI Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева. Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука. С.5–37.  
 Вомперский С.Э. 2006. Научное наследие В.Н. Сукачева и некоторые актуальные вопросы биогеоэкологии и болотоведения // Идеи биогеоэкологии в лесоведении и лесоразведении. М.: Наука. С.32–42.  
 Вомперский С.Э. 2008. Современные вызовы обоснованию гидромелиораций с позиций биогеоэкологии // Лесное хозяйство. № 4. С.18–19.  
 Вомперский С.Э., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Смагина М.В. 2000. Эмиссия диоксида углерода и метана с поверхности почв лесных и болотных экосистем разной увлажненности в подзоне южной тайги Европейской территории России // Лесопользование и гидроресомелиорация. Мат-лы Всерос. симпозиума. Ч. II. СПб; Вологда. С.113–117.  
 Вомперский С.Э., Рубцов В.В., Дудоров А.В. 1988. Определение параметров лесной осушительной сети // Мелиорация и водное хозяйство. № 4. С.38–40.  
 Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. 2007. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. № 2. С.197–210.  
 Елпатьевский М.П. 1957. Лесная осушительная мелиорация. М.; Л.: Гослесбумиздат. 121 с.  
 Иванов К.Е. 1953. Гидрология болот. Л.: Гидрометеиздат. 296 с.  
 Изменение климата – 2007: научно-физическая основа. Вклад рабочей группы I в Четвертый оценочный доклад МГЭИК. 2007. / Ред. С. Соломон, Д. Чин, М. Мэннинг. 2007. 163 с.  
 Нормативы для определения лесоводственной эффективности осушения. 1977. М.: Союзгипролесхоз. 184 с.  
 Паников Н.С. 1995. Таежные болота – глобальный источник атмосферного углерода? // Природа. № 5. С.14–25.  
 Писарьков Х.А., Тимофеев А.Ф. 1964. Гидротехнические мелиорации лесных земель. М. 275 с.  
 Пятецкий Г.Е. 1963. Осушение лесных земель в Карелии. Петрозаводск: Карельское кн. изд-во. 90 с.  
 Романов В.В. 1961. Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеиздат. 359 с.  
 Сабо Е.Д. 1966. Новое в лесоосушении. М.: Лесн. пром-сть. 198 с.  
 Сабо Е.Д., Иванов Ю.Н., Шатилло Д.А. 1981. Справочник гидроресомелиоратора. М.: Лесн. пром-сть. 199 с.  
 Саковец В.И., Германова Н.И., Матюшкин В.А. 2000. Экологические аспекты гидроресомелиорации в Карелии. Петрозаводск: КарНЦ, Ин-т леса. 155 с.  
 Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. М.: Метеорология и гидрология. 324 с.

- Сукачев В.Н. 1957. Развитие лесной типологии в СССР за 40 лет // Достижения науки в лесном хозяйстве СССР за 40 лет. М.: Гослесбумиздат. С.5–16.
- Технические указания по осушению лесных площадей. 1971. М.: Лесн. пром-сть. 215 с.
- After Wise Use – the future of Peatlands. 2008. Proc. of the 13<sup>th</sup> Internat. Peat Congress. Vol. 1. Oral Presentations. 724 p.
- Aselman I., Crutzen P.J. 1989. Freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emission // *J. Atmos. Chem.* No. 8. P.307–358.
- Brown A., Mathur S.P., Kushener D.J. 1989. An ombrotrophic bog as a methane reservoir // *Global Biogeochem. Cycles.* Vol.3. P.205–213.
- Bubier J.L., Moore T.R., Roulet N.T. 1993. Methane emissions from wetlands in the Midboreal region of Northern Ontario, Canada // *Ecology.* Vol.74. No. 8. P.2240–2254.
- Crill P., Harqreaves K., Korhola A. 2000. The role of peat in Finnish greenhouse gas balances. Ministry of trade and Industry Finland. 71 p.
- Dillon P.J., Molot L.A. 1997. Effect of landscape from export of dissolved organic carbon iron, and phosphorus from forested stream catchments // *Water Research.* No. 33. P.2591–2600.
- Gorham E. 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecological Applications.* Vol.1. No. 2. P.182–195.
- Granberg G., Mikkilä C., Sundh I. et al. 1997. Sources of spatial variation in methane emission from mires in northern Sweden: a mechanistical approach in statistical modeling // *Global Biogeochemical Cycles.* No. 11. P.135–150.
- Heikurainen L. 1960. Metsäojitus ja sen perustet. Helsinki. 378 p.
- Inoue G., Takahashi Y., Maksyutov S. et al. 1997. Methane emission rate from the wetland in West Siberia and its controlling factors // Proc. 5<sup>th</sup> Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies Between Japan and Russia in 1996. Tsukuba: Isebu. P.34–39.
- Joosten H., Clarke D. 2002. Wise use of mires and peatlands // Background and Principles Including a Framework for Decision Making. Saarija, Finland. 303 p.
- Laine J., Minkkinen K. 1996. Forest drainage and the greenhouse effect // Peatlands in Finland. Ed. Vasander H. Finnish Peatland Society, Helsinki. P.10–19.
- Mäkkilä M., Saarmisto M. 2008. Carbon accumulation in boreal peatlands during the Holocene – impacts of climate variations // Peatlands and Climate Change. Ed. M. Strack, Intern. Peat Society, Finland. P.24–43.
- Mikkilä C. 1997. Methane emissions from a Swedish mixed mire in relation to microtopographical features. Licentiate dissertation. Umea. 16 p.
- Mikkilä C., Nilsson M., Sundh I., Granberg G., Svensson B., Ranney B. 1999. Methane emission from Swedish mires – national and regional budgets and dependence on mire vegetation // Methane Emission from Swedish Mires –

- in Relation to Different Special and Temporal Scales. Umea. P.1–29.
- Minkkinen K., Korhonen R., Savolainen I., Laine J. 2002. Carbon balance and radiation // Forcing of Finnish peatlands 1900–2100 – the Impact of forestry biology, 2002. 8. P.785–799.
- Minkkinen K., Laine J. 1998. Effect of Forest drainage on the peat bulk density of pine mires in Finland // *Can. J. For. Res.* Vol.28. P.178–186.
- Minkkinen K., Laine J., Hökkä H. 2001. Tree stand development and carbon sequestration in drained peatland in Finland – a simulation study // *Silva Fennica.* Vol.35. P.55–69.
- Moore T.R., Bubier J.L., Frohling S.E., Lafleur P.M., Roulet N.T. 2002. Plant biomass and production and CO<sub>2</sub> exchange in an ombrotrophic bog // *J. Ecol.* Vol.90. P.25–36.
- Naumov A.V. 2001. Emission of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in connection with temperature conditions of peat bog soils in the Northern taiga subzone // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. Novosibirsk. P.110–112.
- Naumov A., Huttunen J., Repo M., Chichulin A., Peregon A., Filipov L., Lapshina E., Martikainen P., Bleuten W. 2007. West Siberian peatlands: comparative study of greenhouse gas emission in middle taiga and forest tundra climatic condition // West Siberian and Carbon Cycle: Past and Present. Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Symp. Ed. S. Vompersky. Tomsk. P.132–135.
- Roulet N.T., Lafleur P.M., Richard P.J., Moore T.R., Humphreys E.R., Bubier J.L. 2006. Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatlands // *Global Change Biology.* Vol.12. P.1–15.
- Seppälä K. 1972. Ditch spacing as a regulator of post-drainage stand development in spruce and pine swamps // *Acta forestalia Fennica.* Vol.125. P.1–25.
- Strack M., O'Brien J.R.P., Waddington J.M. 2008. Assessing the role of ecological succession for peatland methane dynamics: potential climate change feedback // After Wise Use – the Future of Peatlands. Proc. the 13<sup>th</sup> Internat. Peat Congress. Vol.1. Oral Presentations. P.637–640.