

УДК 631.4

## ОТВЕТ А.В. СМАГИНУ: II. УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС РОССИИ

Глаголев М.В.<sup>1, 2, 3, 4</sup>, Сабреков А.Ф.<sup>3, 4</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2)</sup>Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск)

<sup>3)</sup>Институт лесоведения РАН (пос. Успенское, Московская обл.)

<sup>4)</sup>Томский государственный университет

m\_glagolev@mail.ru

В ответ на высказанное А.В. Смагиным замечание о дисбалансе углеродного цикла экосистем на территории России и возможных причинах этого явления проводится ревизия углеродного баланса на основе литературных данных. Приходная статья баланса – чистый экосистемный обмен – оценивается разными авторами примерно в 450 МтС/год (и эта же величина соответствует нижней границе интервала неопределенности оценки И.Н. Кургановой, критикуемой проф. Смагиным). Данная величина неплохо согласуется с восстановленными методом обратной задачи величинами поглощения углерода наземными экосистемами Северного полушария. В качестве расходных статей рассматриваются сток углерода через реки (70-76 МтС/год), эмиссия метана в атмосферу (16 МтС/год), депонирование углерода в виде торфа в болотах (50 МтС/год) и в виде гумуса почв (110 МтС/год), а также отложения элементарного углерода, формирующиеся при пожарах в естественных экосистемах (120 МтС/год). Разница между приходной и расходными статьями баланса оказывается около 80 МтС/год, что в соответствии с литературными данными вполне можно принять как естественный прирост биомассы экосистем на территории России.

**Ключевые слова:** инвентаризация, растворенный углерод, метан, торф, углерод почв, эмиссия углерода при пожарах.

**Цитирование:** Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. 2014. Ответ А.В. Смагину: II. Углеродный баланс России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 5. № 2 (10). С. 50-70.

«Спорь с человеком умнее тебя – ... из самого твоего поражения ты можешь извлечь пользу для себя. Спорь с человеком ума равного: ...ты по крайней мере испытаешь удовольствие борьбы. Спорь с человеком ума слабейшего; ...ты можешь быть ему полезным. Спорь даже с глупцом! Ни славы, ни выгоды ты не добудешь – но отчего иногда не позабавиться. Не спорь только с... С...!».

И.С. Тургенев (цит. по [Родос, 2008, с. 13]).

## ВВЕДЕНИЕ

### О проблеме регионального углеродного бюджета

В своей дискуссионной статье, опубликованной в данном номере ДОСигИК, Андрей Валентинович Смагин, среди прочего, затронул один из важнейших вопросов современной экологии – проблему корректного подсчета регионального бюджета углерода.

Углеродный цикл занимает особое место в проводимых в настоящее время лесоэкологических и климатологических исследованиях, поскольку существование растений невозможно без поглощения углерода из атмосферы и последующего возвращения; с другой стороны, именно соединения углерода, являясь основными химическими компонентами естественных и антропогенных выбросов, определяют парниковый эффект. Это объясняет значительный интерес научной общественности к изучению углеродного цикла на лесных и болотных территориях [Ваганов и др., 2005, с. 631-632]. До середины 60-х гг. XX-го столетия исследование углеродного цикла и его составляющих проводилось в основном биологами и геохимиками. Но именно рост содержания атмосферного углекислого газа, установленный

на основании измерений концентрации CO<sub>2</sub> на станциях глобального мониторинга, которые действуют начиная с 1958 г., привлек к этой проблеме специалистов разных профилей [Кобак, 1988, с. 3].

И хотя мы не являемся специалистами в этой области, но, тем не менее, данная проблематика близка основным нашим научным интересам (которые состоят в измерении и моделировании одной из составляющих большого круговорота углерода, а именно – цикла метана). Она не могла нас не заинтересовать, поэтому мы рискнем высказать несколько своих соображений<sup>1</sup>. Вообще нашей целью было: попытаться проанализировать положения, сформулированные Андреем Валентиновичем с позиций, так сказать, внешнего наблюдателя, не занимающегося непосредственно углеродным циклом, но все-таки имеющего представление об измерении и моделировании потоков углерода. Действительно ли Россия не может в настоящее время ежегодно аккумулировать достаточно большие объемы углерода? Или все-таки может? Если может, то – в каком виде? И все ли потоки углерода измеряются, когда специалисты пытаются получить оценки для большого региона? Или о каких-то потоках забывают? Если забывают, то о каких? И насколько могут быть велики эти потоки? Вот те основные вопросы, на которые мы попытались ответить в данной статье.

### Используемые сокращения

MeMiП – метод микровихревых пульсаций;

МиМ – микрометеорологические методы;

МОЗ – метод обратной задачи;

РНУ – растворенный неорганический углерод (так называемый «ионный сток», т.е. углерод, растворенный в воде в форме<sup>2</sup> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> [Рысков и др., 2004, с. 142]);

PCY – растворенная свободная углекислота.

## ДИСКУССИОННЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА РОССИИ

### Различные методы дают сток углерода на территории России порядка сотен мегатонн в год

1) А.В. СМАГИН: "...рассмотрим... итог многолетней работы коллектива ИФХиБПП РАН (Пушино) под руководством проф. В.Н. Кудярова, вошедший в коллективную монографию «Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России» [2007], а также в докторскую диссертацию одного из основных исполнителей – И.Н. Кургановой «Эмиссия и баланс диоксида углерода в экосистемах России» [2010]. В нем Россия представлялась как «безусловный сток углерода» в размере порядка 1 Гт/год или около 25% от первичной продукции фотосинтеза... Что это? Реальный результат или все же артефакт, связанный с методологией исследований. С логической точки зрения трудно предположить, что существует столь высокий дисбаланс (четверть от ежегодной первичной продукции) в сторону ассимиляции углерода на территории почти 1/8 суши планеты”.

ОТВЕТ: К сожалению, проф. Смагин не сообщил важнейшую подробность: в последнем абзаце Главы 7 «Баланс углерода в залежных экосистемах умеренной зоны и на территории Российской Федерации» Ирина Николаевна Курганова [2010] указывает, что «неопределенность величины углеродного баланса на территории России составляет не менее 50%». Это же повторяется и в ее Выводе № 10: «Современный баланс углерода на территории России на момент 2005-2006 гг. оценивается приблизительно 0.9 ГтС/год... Неопределенность данной оценки высока и составляет не менее 50%». Таким образом, следует обсуждать, скорее, не величины «порядка 1 Гт/год», а разброс значений, по крайней мере, от 0.45 до 1.35 Гт/год. Считать ли величину 0.45 Гт/год также «высоким дисбалансом»? Или это уже вполне разумная величина? Скажем сразу: нам не кажется нелогичным, что существует такой дисбаланс. И непонятно, почему речь идет только об 1/8 суши планеты, ведь

<sup>1</sup> Поскольку, возможно, соображения эти окажутся дилетантскими, то хотим сразу предупредить об этом читателей, а Редакцию убедительно просим отправить статью на рецензирование, хотя и подаем ее в разд. «Дискуссии», который (по умолчанию) рецензируемым не является.

*Пробьса авторов была удовлетворена и статья прошла рецензирование в обычном порядке. – Ред.*

<sup>2</sup> Я.Г. Рысков и др. [2004, с. 142] при этом не указывают заряды, а пишут просто «CO<sub>3</sub> + HCO<sub>3</sub>», но это, конечно, досадная описка.

Кудеяров и др., [2007, с. 284-285] приводят результаты довольно значительного поглощения CO<sub>2</sub> еще и умеренным климатическим поясом Северной Америки (территория США). Может ли быть величина этого дисбаланса настолько высокой? Конечно, какие-то физические ограничения для этой величины должны существовать, но Андрей Валентинович их не приводит, а чисто интуитивно они не ясны. И так, нам представляется, что дисбаланс в размере, по крайней мере, около 0.5 Гт/год на территории почти 1/8 суши существовать может. Дело в том, что *оценка, полученная под руководством проф. В.Н. Кудеярова – далеко не единичная. К настоящему времени близкие величины получены многими ведущими отечественными и зарубежными учеными. Причем важно отметить, что эти оценки получались при использовании различных методов.*

F. Chevallier et al. [2014] вычислили региональные и глобальные потоки CO<sub>2</sub> по данным японского спутника GOSAT (Japanese Greenhouse gases Observing SATellite). Причем это было сделано шестью способами (2 различных алгоритма применялись к 3 разным моделям атмосферного транспорта). Для проверки полученные результаты сравнивались с потоками, вычисленными методом обратной задачи<sup>3</sup> (МОЗ) для поля концентраций, измеренных наземными средствами. Для Северного полушария по данным наземных измерений оценка LSCE-39<sup>4</sup> дала сток  $2.6 \pm 0.3$  ГтС/год, LSCE-19 – 1.7 ГтС/год и UoE – 2.1 ГтС/год.

Таким образом, «высокий дисбаланс» ~0.45-1.35 Гт/год, как раз «с логической точки зрения» представляется весьма уместным, ибо именно такой дисбаланс объясняет наблюдающееся поле концентраций CO<sub>2</sub> в Северном полушарии. Хотим подчеркнуть, что мы не считаем это абсолютной истиной; возможно, со временем в используемых алгоритмах и/или данных будут обнаружены фатальные ошибки и выяснится, что величины ~0.45-1.35 Гт/год были рассчитаны неправильно и для территории России они намного превышают истинные значения. Может быть. Но пока как раз такие или близкие величины довольно часто возникают в работах различных ученых (получающих их разными методами!) и представляются логичными, потому что именно такими стоками можно объяснить наблюдаемое поле атмосферных концентраций. Если сток будет существенно меньше, то концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере должны быть существенно больше наблюдаемых.

Расчет полного углеродного бюджета России, проведенный акад. Е.А. Вагановым и др. [2005], показал, что в среднем за период 1961-1997 гг. лесные земли России поглощали из атмосферы  $0.43 \pm 0.07$  ГтС/год. В докторской диссертации И.Н. Кургановой [2010] показано, что величина секвестра углерода в России за счет исключения земель из сельскохозяйственного пользования, в среднем составляла  $0.017 \pm 0.002$  ГтС/год (вероятно, эти данные относятся к 1990-2005 гг.). Таким образом, и по этим оценкам мы легко получаем до 0.52 ГтС/год. Кстати, Е.А. Ваганов и др. [2005] проводили непрерывные исследования углеродного баланса лесной экосистемы в южной подзоне средней тайги (60° 45' с.ш., 89° 23' в.д.) методом микровихревых пульсаций<sup>5</sup> (MeМиП). Измерительная система была установлена в одновозрастном (200-летнем) однородном сосновом древостое V класса бонитета, произрастающего на песчаных почвах. Было показано, что исследуемый древостой является существенным аккумулятором атмосферного CO<sub>2</sub>. За изучаемый период накопление углерода составило в среднем  $1.8 \text{ тС} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$  (подробнее об этих измерениях см. также в [Шибистова и др., 2002]).

В недавнем блестящем докладе Н. Dolman and A. Shvidenko [2013] представили новейшие оценки поглощения углерода на территории России (в которую, правда, они включили Украину, Беларусь и Казахстан). Эти оценки были получены тремя различными способами – не только на основе обычной инвентаризации, но и с использованием MeМиП и МОЗ. Все оценки дали примерно одинаковые результаты, хотя интервал неопределенности оказался очень большим: поглощение от 0.342 (для всех методов) до 1.350 ГтС/год (максимальная величина по МОЗ). Средняя оценка (по всем трем методам)

<sup>3</sup> С методом обратной задачи, называемым в англоязычной литературе «inverse modeling», можно познакомиться, например, в [Brown, 1993; Mikaloff-Fletcher et al., 2004; Bergamaschi et al., 2007; Kim et al., 2011] и приведенной в этих статьях литературе.

<sup>4</sup> Мы не будем здесь описывать, чем отличается один вариант расчета от другого, а заинтересованный читатель может за подробностями обратиться к оригинальной публикации.

<sup>5</sup> С методом микровихревых пульсаций, называемым в англоязычной литературе «eddy covariance» или «eddy correlation», можно познакомиться, например, в [Connolly et al., 2009; Глаголев и др., 2010; Budishchev et al., 2014] и приведенной в этих работах литературе.

составила 0.6135 ГтС/год, причем важно отметить, что несмотря на большие разбросы, средние значения, выдаваемые каждым методом, находились в хорошем соответствии друг с другом. Эмиссия метана, учтенная отдельно, составила 0.0414 ГтС/год (тогда, вероятно, чистое поглощение углерода территорией «России» составит  $0.6135 - 0.0414 \approx 0.57$  ГтС/год). И хотя авторы честно признают ряд существенных проблем (ограниченное число географических точек, где реализованы измерения МеМиП; трудности с масштабированием в МОЗ и др.), мы не можем не отметить хорошее совпадение этой оценки с приведенными выше оценками из [Ваганов и др., 2005; Курганова, 2010]. К этому следует добавить, что данная оценка довольно хорошо соответствует более ранней уточненной оценке ПУБ-1990 Международного Института Прикладного Системного Анализа [Йонас и др., 2003; Нильссон и др., 2003], также полученной на основе МОЗ, а не камерного метода. При этом последняя (дающая усредненный по 1988-2002 гг. сток атмосферного углерода на уровне 0.53 ГтС/год) хорошо соответствовала оценке House et al. (2003), но имела вполне разумную погрешность (около 50%), тогда как House et al. давали свою оценку с погрешностью > 100%.

### **Интенсивность стока углерода на территории России не постоянна**

2) А.В. СМАГИН: Если это постоянное явление, значит, в масштабах эволюции оно должно было бы привести к гигантским резервуарам углерода на поверхности. Сами авторы в работе [Пулы..., 2007] указывают, что с конца ледникового периода Россия накопила более 300 Гт  $S_{org}$ . Но это соответствует при возрасте голоцена в 10000 лет 0,03 Гт/год, а никак не 1Гт.

ОТВЕТ: Во-первых, что это за «масштабы эволюции»? Если имеется в виду некоторый промежуток времени, характерный для каких-то эволюционных изменений, то он будет у разных видов несколько различным. Во-вторых, при чем здесь вообще эволюция? И, наконец, в-третьих: ответ, возможно, содержится в самом вопросе – «если это *постоянное* явление», то приходим к абсурду, следовательно, логично предположить, что явление это не постоянно (но это вовсе не отменяет возможность его существования в настоящее время). Очевидно, что 10000 лет – это довольно длительный срок, в течение которого, безусловно, климат не был абсолютно постоянным. Следовательно, могли быть периоды, когда углерод депонировался в наземных экосистемах (как, по-видимому, это имеет место сейчас), а были и такие периоды, когда его запасы в этих экосистемах падали. Таким образом, в среднем по голоцену вполне может оказаться верным значение 0.03 Гт/год. Но ему совершенно не будет противоречить и в 10-20 раз большее значение, возможно, характерное для нашего времени (не будет противоречить в том случае, если на протяжении голоцена были периоды, когда наземные экосистемы на территории РФ из стока превращались в источник подвижного углерода).

Совершенно явно о непостоянстве говорит и К.И. Кобак [1988, с. 195-196]<sup>6</sup>: «...на основании подробных данных по некоторым странам и отдельным регионам (Европейской части России,... США) можно представить, что значительная вырубка лесов с развитием промышленности и ростом населения привела во второй половине прошлого столетия к обширной деструкции лесных экосистем умеренной зоны. В результате функционирования их как нетто-источника углерода... с 1860 по 1900 г. ...». Отметим себе – с 1860 по 1900 г. лесные территории ЕЧР были нетто-источником углерода. А потом? Кира Ивановна четко отвечает и на этот вопрос: «Благодаря проведению интенсивных работ по лесовосстановлению в начале XX в. и особенно после второй мировой войны леса умеренной зоны постепенно превращаются в нетто-сток углерода из атмосферы».

Непостоянство (по крайней мере локальной) скорости аккумуляции углерода подтверждают и экспериментальные данные. В недавно вышедшей работе [Lapshina et al., 2014] показано, что, в частности, болота, расположенные на левом берегу р. Енисей (на участке между 60°02'-61°00' с.ш. и 88°05'-89°56' в.д.) аккумулировали торф на протяжении голоцена с возрастающей интенсивностью: последние 1000 лет – 2 мм/год, 12500-9000 лет до н.э. – со скоростью 0.8 мм/год, а раньше скорость была еще меньше – не более 0.2 мм/год.

Наконец, в работе [Нильссон и др., 2003], о которой речь уже шла выше, прямо указывается, что установлена существенная межгодовая изменчивость секвестра углерода, а также трендовые различия по пятилетиям для отдельных потоков. Мы специально приводим здесь эту работу, поскольку проф. Смагин

<sup>6</sup> Кстати, проф. Смагин ссылается на эту работу, но пытается при помощи нее доказать утверждение о том, что «в России лесные и болотные экосистемы достаточно автономны по круговороту углерода и используют свой же эмитированный  $CO_2$ » - мы обсудим это ниже в разд. «А что пишут классики?».

не мог ее не знать (равно как и работы [Йонас и др., 2003; Рысков и др., 2003, с. 99]), ибо в том же самом сборнике, где она опубликована, есть и целый ряд работ Андрея Валентиновича. Сборник выдавался всем участникам конференции, и трудно предположить, что Андрей Валентинович читает лишь свои работы, а на другие, посвященные интересующим его вопросам, внимания не обращает. Но **почему же теперь он делает вид, что значительный секвестр углерода обнаружен только в работе коллектива ИФХиБПП РАН? И почему не сообщает читателю, что, вообще говоря, аналогичные оценки получены очень многими коллективами, в том числе и другими выдающимися учеными современности кроме проф. В.Н. Кудеярова и д.б.н. И.Н. Кургановой различными методами? Зачем обсуждает предположение о постоянстве стока углерода и не сообщает, что его существенная межгодовая изменчивость, в общем-то, особых сомнений не вызывает?**

### **Реки могут выносить с территории России более 70 мегатонн углерода в год**

3) А.В. СМАГИН: Дисбаланс в 1 Гт предполагает ежегодную аккумуляцию на сухопутной территории России оцененной в 1,7 млрд га..., около 60 гС/м<sup>2</sup>. Ни зарастание заброшенных пашен, ни аккумуляция в болотах не могут покрыть и 10% от указанной величины. Может быть речь идет о какой-то вспышке продуктивности, как отклика на повышение СО<sub>2</sub> в атмосфере?

ОТВЕТ: Андрей Валентинович очень правильно ставит вопрос – как бы ни были мы уверены в результатах современных измерений углеродного баланса, но пока не поймем, в каком же резервуаре накапливается этот дисбаланс (пусть и не 1, но хотя бы 0.45 Гт/год), уверенность наша не будет иметь под собой прочного основания. И в связи с этим мы хотели бы обратить внимание на одно важное место в [Кудеяров и др., 2007, с. 283].

Там среди прочих (очевидных «зарастание заброшенных пашен,... аккумуляция в болотах» и прирост лесов) приводится такое объяснение: «Эрозионные процессы, поверхностный и подземный сток воды также вносят определенный вклад в расходную часть углеродного баланса. Поверхностный сток несет в себе как твердые углеродсодержащие частицы, так и растворенный углерод в виде лабильных органических фракций, карбоната и бикарбоната. Органический углерод в твердом стоке представляет собой, в основном, почвенный гумус, устойчивый к быстрому разложению... Речной сток на территории России, в основном, направлен в арктические моря. Водосборная территория рек, впадающих в эти моря, составляет около 1.3 млрд. га или более 80% от всей сухопутной территории России...». Отсюда следует, что на территории РФ вполне может потребляться из атмосферы 1 ГтС/год (точнее говоря, 0.45 Гт/год), но нет смысла искать – в каком резервуаре, расположенном на той же территории, запасается углерод **именно в таком** количестве. Он может запасаться в количестве существенно меньшем, а разность выносится в океан. Таким образом, усилия надо сосредоточить на определении количества углерода, выносимого в арктические моря. Какую часть наблюдаемого дисбаланса оно может объяснить?

Увы, полного бюджета для всех рек России нет, есть только данные для некоторых северных – Оби, Енисея, Лены, Яны, Колымы. Поэтому возможно очень грубо рассчитать суммарный сток органического углерода через имеющийся набор данных о стоке углерода через некоторые реки и суммарный расход всех рек России. По данным [Lobbes et al., 2000; Stein et al., 2003; Amon et al., 2012] средний ( $\pm$  стандартное отклонение) суммарный сток углерода из наземных экосистем в виде взвешенного и растворённого органического вещества (включая лигнин) составляет  $8.54 \pm 0.20$  МтС/год на 1000 км<sup>3</sup>/год расхода воды рек. Суммарный расход рек России по многолетним данным, приведённым в [Dai and Trenberth, 2002], составляет  $2781 \pm 434$  км<sup>3</sup>/год. Тогда рассчитанный **суммарный сток органического углерода из наземных экосистем России через реки составит  $28 \pm 4$  МтС/год.**<sup>7</sup> Я.Г. Рысков и др. [2004, с. 144] со ссылкой на Е.А. Романкевича и А.А. Ветрова<sup>8</sup> приводят **оценку выноса растворенного неорганического углерода (РНУ) в арктические моря: около 33.8 МтС/год.** В эту величину не входит<sup>9</sup> сток растворенной свободной углекислоты (PCY).

<sup>7</sup> Почти в этих пределах оказывается и оценка суммарного стока органического углерода, которую дали Е.А. Романкевич и А.А. Ветров – 23.5 ТгС/год [Рысков и др., 2004, с. 144].

<sup>8</sup> Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в Арктических морях России. М.: Наука. 2001. 301 с. – Цит. по [Рысков и др., 2004, с. 144-145].

<sup>9</sup> Обычно в углеродных балансах страны учитывается только ионный сток – РНУ [Рысков и др., 2004, с. 142].

Поэтому Я.Г. Рысков и др. [2003, с. 99; 2004, с. 144] выполнили отдельный расчет стока РСУ (правда, также лишь для Северных рек России). Согласно этому расчету *сток РСУ составил  $5.3 \pm 0.8 \text{ МтС/год}$*  (содержание РСУ вычислялось с помощью компьютерной программы SOL v. 22, разработанной Н.Н. Акинфиевым<sup>10</sup>). Поскольку выносить углекислоту (пусть и в меньших количествах) и вообще неорганический углерод, полагаем, могут вообще все реки, а не только Северные, то две последние величины, видимо, следует считать оценками снизу для соответствующих региональных потоков с территории России.

К сожалению как мы видели выше, авторы не приводят точность определения стока РНУ. Но поскольку две остальные оценки имеют точность около 15%, то, вероятно, такую же точность можно принять и для РНУ. Тогда *для суммарного стока органического углерода, РНУ и РСУ будем иметь  $67 \pm 7 \text{ МтС/год}$* <sup>11</sup>. Интересно отметить, что полученная оценка оказалась очень близка к оценке потока углерода в гидросферу с территории РФ на уровне  $62 \pm 14 \text{ МтС/год}$ , которую дали Нильссон и др. [2003]. Аналогичное значение ( $61.76 \text{ МтС/год}$ ) получили Рысков и др. [2004, с. 144], но они отметили, что для подсчета более полного бюджета растворенного углерода необходимо учесть вынос РСУ с подземным стоком, а этого в их (и в нашей) оценке нет. Таким образом, поскольку РНУ и РСУ недооцениваются, в качестве суммарного значения теперь лучше брать не среднюю, а например, максимальную оценку. В любом случае, учитывая существенную погрешность, можно лишь сказать, что мы получили для суммарного стока органического углерода, РНУ и РСУ оценку регионального потока (с территории России) около  $70 \text{ МтС/год}$  (как видим, оценка из [Нильссон и др., 2003] дает до  $76 \text{ МтС/год}$ ).

Только что перечисленные стоки углерода тесно связаны с утверждением проф. Смагина о том, что аккумуляция в болотах не может покрыть и 10% от предполагаемой величины поглощения углерода на территории РФ.

При построении общего баланса углерода особое значение может иметь статья расхода, связанная с миграцией диоксида углерода в грунтовые воды. При низких температурах грунтовые воды способны поглотить весь объем углекислоты, возникающий при распаде органического вещества торфа [Зайдельман и Шваров, 2002, с. 125]. Аналогично, весьма важны и приведенные выше стоки углерода из наземных экосистем в виде взвешенного и растворенного органического вещества. Собственно аккумуляцию (прирост) торфяной массы мы можем и не наблюдать, но болотный массив все равно будет регулярно поглощать из атмосферы огромное количество  $\text{CO}_2$  (и это можно зафиксировать всеми инструментальными методами), направляя его (в данном случае в форме растворенной углекислоты, а также взвешенной и растворенной органики) через грунтовые воды в реки, которые, опять-таки, будут выносить углерод за территорию России.

В заключение данного раздела отметим, что для полноты картины нам следовало бы прибавить еще и растворенный метан, который, формально являясь органическим веществом, не учитывается в таком показателе, как вышеприведенный «суммарный сток органического углерода». Однако, как мы сейчас покажем, вынос метана реками – незначителен.

В результате экспедиционных исследований в Арктике в 2003-2007 гг. были выявлены шлейфы высокого содержания растворенного метана в Восточно-Сибирском море. Измерения метана в шельфовых водах других морей Арктики также показали его высокие концентрации. По данным Шаховой и др.<sup>12</sup>, концентрация метана в водах Оби, Енисея и Лены может быть принята, соответственно, на уровне 30, 70 и 300 нмоль/л, а для Индигирки, Колымы и Яны – 200 нмоль/л [Малахова и Голубева, 2011]. Учитывая, что средние расходы воды перечисленных рек составляют, соответственно, 12700,

<sup>10</sup> Акинфиев Н.Н. Физико-химические основы моделирования гидротермальных систем. Автореф. Дисс.... докт. хим. наук. М.: 1995. 36 с. – Цит. по [Рысков и др., 2004, с. 142, 145].

<sup>11</sup> Здесь при вычислении погрешности мы воспользовались известным правилом из [Румшиский, 1971, с. 163], учитывающим, что при сложении происходит частичная компенсация ошибок разных знаков. Хотя в данном случае, возможно, это правило применять не следовало, т.к. два из трех слагаемых, скорее всего, занижены, так что для них с большей вероятностью следует ожидать ошибки одного и того же знака, а тогда погрешность будет больше, чем  $7 \text{ МтС/год}$ .

<sup>12</sup> Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.Н. Великие Сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // Доклады Академии наук. 2007. Т. 414. № 5. С. 683-685. – Цит. по [Малахова и Голубева, 2011].

19800, 17000, 1850, 3900 и 1000 м<sup>3</sup>/с [Прохоров, 1983, с. 428, 488, 604, 697, 911, 1570], легко подсчитать<sup>13</sup>, что в виде метана эти шесть рек выносят в моря около 1.4 ктС/год. Как видим, суммарный сток этих рек составляет 1291 км<sup>3</sup>/год. Следовательно, даже если во всех реках РФ (суммарный сток которых, как указывалось выше, составляет 2781 км<sup>3</sup>/год) концентрации метана были бы на уровне десятков-сотен нмоль/л, как это имеет место для Сибирских рек, то все равно суммарный вынос метана реками всей России не превысил бы нескольких килотонн углерода, что не имеет значения для обсуждаемого бюджета, где речь идет о мегатонных потоках.

### Метановая «утечка»

Но вот выделение газообразного метана на территории России в углеродном балансе учитывать нужно, потому что это величина довольно существенная. И если мы будем судить о балансе углерода только по потокам СО<sub>2</sub>, то можем потерять десятки мегатонн/год, поскольку именно такой порядок имеет интенсивность преобразования в метан органического вещества, аккумулируемого на территории России. К сожалению, эта интенсивность до сих пор не определена точно, но все-таки некоторое понимание составляющих ее потоков у нас имеется. Однако прежде чем оценивать количественно эти потоки, нужно выделить основные из них.

Николай Михайлович Бажин [2000] указывает следующие источники метана, имевшие хоть какое-то значение для бывшего СССР: обводненные почвы (болота, рисовые поля, тундра), озера, животные, свалки, добыча угля, потери при добыче газа и горение биомассы. Очевидно, что нас интересуют не все из них. При добыче угля и газа выделяется «древний» метан, а не вновь образованный, следовательно, этот метан не является утечкой углерода современного бюджета. Озера и горение биомассы в совокупности дают лишь около 1.4±0.8 МтС-СН<sub>4</sub>/год (в дальнейшем мы не будем каждый раз указывать в размерности, что это именно мегатонны метана, а ограничимся обычной записью «МтС/год»). И хотя эту величину мы учтем, но в силу ее малости не будем тратить усилий на ее уточнение.

Отдельно для рисовников тот же автор в 1993 г. приводил величину 0.15 МтС/год (для всего бывшего СССР). Но А.В. Rozanov [1995] отдельно для рисовников России дал 0.08 МтС/год (что, по крайней мере качественно, согласуется с предыдущей величиной, ибо значительные площади рисовников остались на Украине); кроме того, Андрей Борисович выделил «орошаемые земли» и дал по ним для России величину 0.53 МтС/год. Мы в дальнейшем будем пользоваться суммой двух последних величин, считая, что сельскохозяйственные земли РФ выделяют 0.61 МтС/год метана.

Очевидно, что главный вклад в эмиссию метана из почв России вносят болота. К счастью, эмиссия метана из болот России интенсивно изучалась разными исследовательскими коллективами и различными методами (см., например, [Наумов, 2004; Глаголев и Клепцова, 2009; Sasakawa et al., 2010; Glagolev et al., 2011]), в результате чего было дано множество оценок, которые позволили более или менее надежно оценить поток из почв РФ вообще. Известные нам оценки сведены в табл. 1. Из табл. видно, что если самые первые оценки сильно различались (по-видимому, это было обусловлено малым количеством экспериментальных измерений), то в последние годы все они находятся в хорошем соответствии друг с другом. Поток метана из почвы на уровне 12.6-12.9 МтС/год удовлетворяет практически всем оценкам, в том числе и самым современным. Однако в то время как переувлажненные почвы выделяют метан, большинство автоморфных почв его поглощают (с выделением СО<sub>2</sub>). Методика региональной оценки поглощения СН<sub>4</sub> почвами РФ развивалась нами в [Глаголев и Филиппов, 2011; Глаголев и др., 2014]. Далее мы воспользуемся оценкой 1.8-2.0 МтС/год из последней работы.

Поток метана за счет крупного рогатого скота в РФ И.Л. Кароль и А.А. Киселев [2013, с. 102] оценили величинами 1.4-1.6 МтС/год, что почти соответствует оценке Н.М. Бажина [2000], равной для бывшего СССР 4.65±1.13 МтС/год. Действительно, если в первом приближении принять пропорциональность поголовья скота населению страны, то для перехода от бывшего СССР к России нужно будет оценку Бажина домножить на коэффициент 0.52<sup>14</sup>, в результате чего мы получим 2.4±0.6 МтС/год. Впрочем, Бажин дает свою оценку для животных вообще, а Кароль и Киселев – только для крупного рогатого скота, так что, фактически, следует признать, что оценки находятся в очень

<sup>13</sup> Для простейшего расчета можно просуммировать для всех рек произведение концентрации (в нмоль/л) на расход (в м<sup>3</sup>/с) и результат умножить на переводной коэффициент, равный 3.78·10<sup>-4</sup> тС·с·л/(м<sup>3</sup>·год·нмоль).

<sup>14</sup> Население РСФСР составляло 52% от населения СССР [Прохоров, 1983, с. 1136, 1246].

хорошем соответствии друг другу. Далее мы будем использовать оценку  $2.4 \pm 0.6$  МтС/год, как более общую – данную для животных вообще.

**Таблица 1.** Эмиссия метана из почв России по оценкам разных авторов.

Ссылка	Поток, МтС/год		Примечание
	Исходный	Исправленный	
[Andronova and Karol, 1993]	8.25	<b>5.72</b>	Исходно в данной работе (выполненной методом простейшей инвентаризации) предполагается, что среди почв источниками $\text{CH}_4$ могут быть только болота. Из болот бывшего СССР выделялось около 8.25 МтС/год, при этом на долю Прибалтийских республик, Белоруссию и Украину в сумме приходилось 2.63 МтС/год. Предполагается также, что эмиссия с территории болот других республик пренебрежимо мала. Мы учли еще и поток из сельхозугодий по [Rozanov, 1995].
[Rozanov, 1995]	29.86	<b>29.86</b>	Согласно этой работе, годовая эмиссия $\text{CH}_4$ из естественных почв РФ составляет 29.25, из рисовников – 0.08 и из орошаемых земель – 0.53 МтС/год. Для России автор выделил 21 разновидность почв, способных выделять метан. Были проанализированы результаты 43 измерений эмиссии $\text{CH}_4$ в РФ и 99 – за рубежом. Однако эти измерения покрывали разновидности почв крайне неравномерно, причем для 7 разновидностей вообще не оказалось ни одного измерения.
[Zelenev, 1996]	2.7-82.3	<b>18.0</b>	В данной работе дается несколько различных годовых эмиссий, полученных при разных предположениях. Рекомендуемая самим автором оценка составляет 18.0 МтС/год. Но представляется, что надежность ее довольно низка. Действительно, для России он выделил 34 разновидности почв, способных поглощать или выделять метан. Были проанализированы результаты более чем 500 измерений эмиссии $\text{CH}_4$ (суммарно – в РФ и за рубежом). Однако эти измерения покрывали выделенные разновидности почв крайне неравномерно, причем для 6 разновидностей оказалось лишь по 1-2 измерения.
[Бажин, 2000]	$11.7 \pm 8.3$	<b><math>8.0 \pm 5.6</math></b>	Исходно в данной работе давалась оценка по болотам бывшего СССР. Следуя [Andronova and Karol, 1993], мы предположили, что болота РФ дают 68% от нее.
[Кондратьев и др., 2003; Кондратьев и Крапивин, 2004]	35.25	<b>12.9-18.2</b>	К сожалению, в работах Кондратьева с сотр. лишь сообщается величина потока, но не описывается методика ее получения.
[Mikaloff Fletcher et al., 2004]	29.9	<b>11.1-15.8</b>	Исходное значение соответствует эмиссии изо всех источников на территории РФ. Для пересчета мы воспользовались предположением Кондратьев с сотр. о том, что на болота в РФ приходится 35-50% $\text{CH}_4$ , выделяемого с ее территории. И к этому мы прибавили еще поток из сельхозугодий по [Rozanov, 1995].
[Кароль и Киселев, 2013, с. 102]	14.2-15.9	<b>12.6-17.5</b>	Исходное значение представляло собой эмиссию $\text{CH}_4$ из переувлажненных почв и открытых водоемов, поэтому мы вычли «озерный» поток ( $0.8 \pm 0.8$ ), взятый из [Бажин, 2000]. Последний, в силу его огромной погрешности, не корректировали на площадь с РФ (с площади бывшего СССР).
[Dolman and Shvidenko, 2013]	41.4	<b>10.5-14.7</b>	Исходное значение соответствует эмиссии изо всех источников на территории, включающей РФ, Украину, Беларусь и Казахстан. Для пересчета мы воспользовались, во-первых, предположением Кондратьева с сотр. о том, что на болота приходится 35-50% от общей эмиссии $\text{CH}_4$ , во-вторых, следуя [Andronova and Karol, 1993], приняли, что болота РФ дают 68% от суммарной эмиссии из болот бывшего СССР и, в третьих, учли еще и поток из сельхозугодий по [Rozanov, 1995].
[Zhu et al., 2013]	12.5	<b>13.1</b>	Исходное значение (полученное при помощи математической модели, в качестве которой использовалась нейронная сеть) соответствовало эмиссии из болот. Мы учли еще и поток из сельхозугодий по [Rozanov, 1995].
[Глаголев и др., 2014]	9.2-12.0	<b>9.8-12.6</b>	Исходное значение (полученное при помощи ансамбля простейших математических моделей) соответствовало эмиссии из болот. Мы учли еще и поток из сельхозугодий по [Rozanov, 1995].

Пожалуй, почти так же хорошо, как болота, в плане эмиссии метана изучались полигоны захоронения твердых бытовых отходов – см., например, [Ножевникова, 1995; Смагин и др., 2003; Nozhevnikova et al., 2003; Лебедев и др., 2008]. Поток метана из них А.Б. Лифшиц оценил для России величиной 0.74 МтС/год [Ножевникова, 1995, с. 34]; а И.Л. Кароль и А.А. Киселев [2013, с. 102] дали в два раза большее значение: 1.6-1.8 МтС/год, которое очень хорошо соответствует оценке Н.М. Бажина



[2000], равной для бывшего СССР  $3.53 \pm 1.13$  МтС/год (после пересчета, аналогичного примененному для «животного» потока, получим  $1.8 \pm 0.6$  МтС/год). Усреднив три вышеприведенные оценки и выбрав надлежащий интервал неопределенности, получим, что поток  $1.41 \pm 0.67$  МтС/год удовлетворяет им всем. Далее мы будем использовать именно эту величину.

На основании приведенных выше оценок можно вычислить то количество метана, которое ежегодно образуется из органического вещества, синтезированного из углекислоты, которая была, в свою очередь, аккумулирована из атмосферы. Учтем следующие потоки:

Из обводненных почв - Окисление почвами + (Из озер + горение биомассы) + Из животных + Из свалок,

т.е.

$$(12.75 \pm 0.15) - (1.9 \pm 0.1) + (1.4 \pm 0.8) + (2.4 \pm 0.6) + (1.41 \pm 0.67)$$

В результате получаем приблизительно  $16 \pm 1$  МтС/год. Если при измерении углеродного бюджета РФ мы учитываем только углекислый газ, а также растворенный и взвешенный органический и неорганический углерод, то мы не заметим, что за год с территории России улетит в атмосферу 16 миллионов тонн углерода в виде метана. Например, мы учтем, что дерево дало такой-то прирост, после чего было спилено и из него была изготовлена табуретка – вроде бы, углерод захоронился в виде табуретки. Если табуретка была выброшена и разложилась, то, казалось бы, мы учтем, что углерод вернулся в круговорот... Ан, нет! Следя за углекислым газом, мы бы заметили, что углерод из табуретки опять перешел в атмосферный резервуар, если она была просто сожжена. Но если она была отправлена на свалку и там превратилась (пусть лишь частично) в метан, то вот эту-то часть, которая тоже, безусловно, переместилась в атмосферу, мы не заметим, и будем продолжать считать, что она по-прежнему аккумулирована на территории РФ.

### **Тривиальные стоки могут фиксировать на территории России более 500 мегатонн углерода в год**

Органическое вещество, создаваемое растениями, в конечном итоге поступает в почву. Эти органические остатки подвергаются в почве разнообразным превращениям, в результате которых большая часть органического материала разрушается до простых минеральных соединений, но остальная переходит в более устойчивые формы почвенной органики, такие, как гумус, торф, сапропель и т.п. В анаэробных условиях дальнейший диагенез и метаморфизация гумусовых веществ приводит к образованию керогена, основного органического вещества осадочных горных пород, и битумоида<sup>15</sup>. Изучение физико-химических свойств гумусовых кислот (гуминовых и фульвокислот) и керогена позволило установить, что они образуют последовательный генетический ряд [Кобак, 1988, с. 100, 103, 108-109]:

фульвокислоты → гуминовые кислоты → кероген.

Исследования почвоведов показывают, что количество вновь образовавшихся гумусовых веществ не превышает 10% исходной массы опада<sup>16</sup>, в среднем составляя 6%<sup>17</sup>. Далеко не все гумусовые вещества

<sup>15</sup> Кероген – сложный нерегулярный полимер, не растворимый в воде, органических растворителях, кислотах и щелочах; битумоид экстрагируется органическими растворителями [Кобак, 1988, с. 108].

<sup>16</sup> Кононова М. М. Формирование гумуса в почве и его разложение. – Успехи микробиологии, 1976, № 11, с. 134-151.

Кононова М. М. Органическое вещество и плодородие почвы. – Почвоведение, 1984, № 8, с. 6-20.

Кононова М. М., Александрова И. В. Процессы гумусообразования как звено круговорота углерода в почве. – В кн.: Труды X Международного конгресса почвоведов. Т. 2. М.: Наука, 1974. с. 81-90. – Все цит. по [Кобак, 1988, с. 123, 227].

<sup>17</sup> Гильманова Т. Г., Базилевич Н. И. Количественная оценка источников гумусообразования русского чернозема. – Вестник МГУ, сер. почвоведение, 1983, № 1, с. 9-16.

Oberländer H., Roth K. Transformation of <sup>14</sup>C-labeled plant material in soils under field conditions. – In: Isotopes and radiation in soil organic matter studies. – Vienna, Internat. Atom. Energy. Agency, 1968, p. 241. – Все цит. по [Кобак, 1988, с. 123, 225, 238].

сохраняются в почве и поступают в «стабильный» резервуар почвенного углерода. Часть новообразовавшихся гумусовых веществ (значительно более 50%<sup>18</sup>) вовлекается в новые биологические процессы, поэтому ее называют лабильным или биологически активным гумусом<sup>19</sup>. Другая же часть (2.5% от исходной массы опада), получившая, согласно М.М. Кононовой, название чистого вывода гумусовых веществ, откладывается в почве, образуя так называемый стабильный резервуар. «Чистый вывод» представляет собой своеобразный биологический тупик [Кобак, 1988, с. 123, 125, 127].

Но и «лабильный» гумус, несмотря на свое название, в течение относительно длительного времени может рассматриваться в качестве почти что тупика. Основываясь на данных о темпах гумусообразования и концентрации органического углерода в почвах разных типов и учитывая соотношение лабильной и стабильной частей почвенного резервуара, К.И. Кобак [1988, с. 138-139] рассчитала среднее время релаксации во всем поле органического углерода каждого типа почв. Если ограничить рассмотрение только суббореальным, бореальным и полярным поясами, то результат будет следующим (слева от знака «÷» приводим данные для лабильного, а справа – для стабильного гумуса): время релаксации составило от 533÷1434 лет в лесных областях суббореального пояса до 2726÷7655 лет в полярном поясе.

Я.Г. Рысков и др. [2004, с. 144] (со ссылками на ряд известных ученых) приводят следующие оценки для составляющих почвенного стока: захоронение углерода в болотах – 50 МтС/год<sup>20</sup>, захоронение углерода в тундре – 192 МтС/год<sup>21</sup>, захоронение в результате процессов гумификации – 37.5 МтС/год<sup>22</sup>. Для последней величины относительно близкое значение (51.2 Мт/год)<sup>23</sup> получаем, если взять информацию о годовых чистых выводах гумусовых веществ в разных типах почв из табл. 4.6 в [Кобак, 1988, с. 125] и площади этих типов из табл. 37 в [Добровольский и Урусевская, 2004]. Но подчеркнем, что эта оценка учитывает поток углерода только в резервуар стабильного гумуса. Если же учесть сказанное в предыдущем абзаце о стабильности «лабильного» гумуса на протяжении многих сотен лет, то данная оценка возрастет до 116 Мт/год. Однако Нильссон и др. [2003] обращают внимание на то, что изменение почвенного резервуара углерода на территории России (правда, для краткого периода: 1988-1992 гг.) определялось с очень большой погрешностью и составило  $-38 \pm 155$  МтС/год

<sup>18</sup> Т.е. значительно более 3% от исходной массы опада.

<sup>19</sup> Герасимов И. П., Чичагова О. А. Некоторые вопросы радиоуглеродного датирования почвенного гумуса. – Почвоведение, 1971, № 10, с. 3-11.

Завельский Ф. С. Радиоуглеродное датирование и теоретические модели кругооборота углерода в почвах. – Изв. АН СССР, сер. геогр., 1975, № 1, с. 27-34. – Все цит. по [Кобак, 1988, с. 125, 225].

<sup>20</sup> *Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В.* Заболоченные органические почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17-25. – Цит. по [Рысков и др., 2004, с. 144-145]. Нетрудно проверить: приведенная оценка в пересчете на некоторое «усредненное» болото означает ежегодный прирост его около 1 мм, что представляется достаточно разумной величиной, вполне соответствующей современным представлениям о возрасте болот.

<sup>21</sup> *Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокронос А.Т.* Проективное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных ботанико-географических зон России // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 2. С. 295. – Цит. по [Рысков и др., 2004, с. 144-145]. Но, скорее всего, приведенная величина в 192 МтС/год не слишком надежна, поскольку, как видим, дана она была 20 лет назад, а к тому времени даже по содержанию органического вещества в почвах тундры у исследователей не было единого мнения. Так, К.И. Кобак [1988, с. 111-112] отмечала: «...сильная дифференциация в оценках содержания  $C_{\text{орг}}$  отмечается для тех почв, сведения о которых минимальны... Так, для арктических березняков концентрация  $C_{\text{орг}}$ , по данным Р. Эверета... 2.7 кг/м<sup>2</sup>, по данным В.А. Ковды... в тундровых почвах содержится 23.2 кг С/м<sup>2</sup>, а по данным М.М. Кононовой... 42.3 кг С/м<sup>2</sup>. Для почв Аляски приводятся значения... до 200 С/м<sup>2</sup>».

<sup>22</sup> *Глазовская М.А.* Фоссилизационные функции педосферы в континентальных циклах органического углерода // Почвоведение. 1997. № 3. С. 280-289. – Цит. по [Рысков и др., 2004, с. 144-145].

<sup>23</sup> К сожалению, не совсем понятно, что в точности означают потоки «захоронение углерода в болотах», «захоронение углерода в тундре» и «захоронение в результате процессов гумификации» у Я.Г. Рысков и др. [2004, с. 144]. Например, «захоронение углерода в болотах» – это захоронение любых форм углерода в болотах? Или захоронение в болотах во всех формах, кроме стабильного гумуса (а последний, в свою очередь, учитывается в потоке «захоронение в результате процессов гумификации»)? В связи с этой неопределенностью, не ясно – соответствует ли величина, полученная теперь по данным [Кобак, 1988, с. 125; Добровольский и Урусевская, 2004], в точности этому «захоронению в результате процессов гумификации» или отчасти перекрывается с двумя другими потоками.

(т.е., согласно этой оценке, почва была даже не стоком, а источником углерода; впрочем, утверждать это невозможно, поскольку погрешность, как видим, в 4 раза превышает саму величину потока).

Другим «тривиальным» (в том смысле, что для всех очевидным и всегда учитываемым в углеродном балансе страны) стоком углерода является изменение резервуара углерода растительности. Нильссон и др. [2003] дают в целом для потока в наземные экосистемы России величину 500-550 МтС/год (для 1988-2002 гг.) – в среднем 525 МтС/год. По-видимому, изменение «почвенного» резервуара сюда также входит, ибо почву принято рассматривать как компонент естественных экосистем. Если принять оценку для изменения почвенного резервуара из [Рысков и др. 2004, с. 144], то на долю собственно прироста растительности останется  $525 - (50 + 192 + 37.5) = 245.5$  МтС/год.

По оценке [Нильссон и др., 2003] потоки в литосферу составили на территории России  $20 \pm 7$  ТгС/год. Однако, по-видимому, часть этих потоков не следует добавлять к другим только что перечисленным. Если, например, речь идет об образовании керогена, то это не отдельный добавочный поток, а часть уже учтенного нами «почвенного стока». Действительно, ведь выше мы уже учли гумификацию, а теперь оказывается, что уже учтенная часть углерода, захороненного сначала в виде гумуса, на самом деле захоронена<sup>24</sup> в виде керогена, как это следует из приведенной выше простейшей схемы (и более подробно описано, например, в [Кобак, 1988, с. 108-110, 123]). Но, возможно, какая-то часть, например сток в карбонатный резервуар<sup>25</sup> почв, должна прибавляться.

Однако кроме вышеперечисленных, хотим обратить внимание читателей еще на один возможный процесс (поток углерода), который обычно воспринимается только как источник и тем самым маскируется та его часть, которая является стоком.

### **Лесные пожары – еще один сток (!!) углерода**

Как и проф. А.В. Смагин, один из авторов данной статьи никогда не доверял камерному методу и (тем более!) пространственным интерполяциям данных, полученных с его помощью. Но когда стали появляться данные измерений МиМ, лишенных недостатков камерного метода, то нужно было как-то объяснить себе остающийся парадокс. Хотя, вообще-то говоря, никакого парадокса, по сути дела, и не было. Те исследователи, которые при помощи МиМ наблюдали значительный сток углерода на своих исследовательских площадках, могли воочию увидеть, куда же этот сток идет – в растущие болота и деревья, в торфяную массу и в молодую поросль. Но не могут же деревья и болота расти без конца. Что же будет дальше? Как правило – пожар. Именно так можно было объяснить себе «парадокс 1 Гт» – все измеряют в идеальных условиях хорошо оборудованных научных полигонов и строят интерполяции (и экстраполяции) по данным этих измерений. А на пожарах почти никто не измеряет<sup>26</sup>. Поэтому получающиеся из таких работ для территории РФ данные углеродного баланса – это, фактически, гипотетическое число, означающее, каким был бы углеродный баланс, если бы не было пожаров. И тут вдруг стали появляться спутниковые данные, поставившие жирный крест на таком объяснении. Ведь углерод (в форме CO<sub>2</sub>), выделяющийся при пожарах, поступает опять в атмосферу и, следовательно, учитывается сенсорами спутников. Т.е., казалось бы, МОЗ с использованием спутниковых данных должен дать нам нулевой баланс, а он опять дает необъяснимую 1 ГтС (правда, снова с очень большим доверительным интервалом, так что и здесь мы можем говорить не про 1 ГтС, а про несколько сотен

<sup>24</sup> Полное исчезновение гуминовых кислот и образование керогена свидетельствуют об окончании диагенеза органического вещества. В дальнейшем на новой (катагенетической) фазе превращения керогена происходят уже под влиянием литогенетических факторов – повышения температуры и давления, процессов раскристаллизации минеральной части осадков и др. В одних условиях дальнейшая циклизация и конденсация структуры керогена приводит в конечном итоге к образованию графита, а в других – происходит отщепление некоторых подвижных соединений. Содержание битумоида, как правило, увеличивается по мере катагенетических преобразований керогена, и в его составе возрастает фракция углеводородов. На определенной стадии преобразований органического вещества и в определенных условиях этот процесс достигает максимального развития, что получило название главной фазы нефтеобразования [Кобак, 1988, с. 110]. Таким образом, углерод из атмосферы в конечном итоге аккумулируется в виде нефти и графита (угля).

<sup>25</sup> Карбонатный резервуар почв занимает особое место в глобальном цикле. Он находится в области между геологическим и биосферным резервуарами, поскольку многие из карбонатных отложений крайне малоподвижны и имеют очень большой возраст [Кобак, 1988, с. 117].

<sup>26</sup> Пример из собственного опыта. Когда пожар уничтожил часть нашего исследовательского полигона на Бакчарском болоте, мы... больше никогда на этой части измерений не делали, говоря: «Ну это же – не типичное болото, оно же сгорело».

млн. т). Ответ дали, как и положено, труды классиков. У акад. Е.А. Ваганов и др. [2005, с. 643] по поводу нетто-выбросов углерода при пожаре читаем: «Расчет упрощенно базируется на предположении, что 50% сгоревшей фитомассы высвобождается в атмосферу. В действительности значительная часть этого углерода осаждается в земных и водных экосистемах в форме практически не разлагающегося элементарного углерода».

Попробуем хотя бы очень грубо оценить объем этого стока ( $F_f$ , ГтС/год). Обозначим через  $P$  (ГтС/м<sup>2</sup>) – поверхностную плотность лесной биомассы (ее можно оценить как отношение:  $R/S$ );  $R$  (ГтС) – пул углерода лесов РФ;  $S$  (м<sup>2</sup>) – площадь лесов РФ;  $S_f$  (м<sup>2</sup>/год) – лесную площадь, пройденную огнем;  $\alpha$  – долю углерода, осаждающуюся в земных и водных экосистемах в практически не разлагающейся форме, тогда

$$F_f = \alpha \cdot P \cdot S_f = \alpha \cdot R \cdot S_f / S.$$

Поскольку Андрей Валентинович указывает, что по данным А.С. Исаева и Г.Н. Коровина  $R = 40$  Гт, то, приняв  $S = 6.2 \cdot 10^{12}$  м<sup>2</sup> (по оценке И.В. Филиппова из [Глаголев и Филиппов, 2011], получим  $P = 40/6.2 \cdot 10^{12} \approx 6.4 \cdot 10^{-12}$  ГтС/м<sup>2</sup>; Е.А. Ваганов и др. [2005, с. 642] сообщают, что, например, в 2003 г.<sup>27</sup>  $S_f = 1.8862 \cdot 10^{11}$  м<sup>2</sup>/год.

Труднее всего для нас оценить величину  $\alpha$ . Выше уже было приведено указание из [Ваганов и др., 2005, с. 643] о том, что  $\alpha$  составляет значительную часть от 50%. Но, к сожалению, указание это не слишком конкретное. Действительно, какая часть может считаться «значительной»: половина, треть четверть, а м.б. еще меньшая?

Э.Н. Валендик и Н.Ф. Гевель провели анализ недожога с использованием специальной лабораторной установки (исследовалось горение лишайника *Cladonia*, мха, опада хвои сосны, опада из отмершей травы и веточек сосны). В частицах дыма было обнаружено ( $0.68 \pm 0.62$ )% сажи (от массы сухого образца). Э.В. Конев<sup>28</sup> считает возможным моделировать исходные лесные горючие материалы гипотетическим однокомпонентным веществом, состав которого приближенно определяется формулой  $C_6H_9O_4$ . С учетом содержания углерода в этом «соединении» (49.7%) получаем, что в сажу переходит ( $1.4 \pm 1.3$ )% углерода. К сожалению, А.М. Гришин [1992, с. 138] цитирует оригинальное исследование несколько неясно: в тексте речь идет именно о % от массы сухого образца, но они совпадают с соответствующими % потери тепла, приводимыми в таблице 2.6, также цитируемой по оригинальной публикации. Однако в этой таблице есть не только информация по частицам дыма, но и по недожогу углеродистого участка. Причем, в этом случае величины даются намного большие: в зависимости от влагосодержания образца потери тепла, обусловленные недожогом лишайника *Cladonia*, составляют 10.8-12.2%; мха Шребера – 19.6-70.4%; травяной ветоши – 22.62-45.22%; опада сосновой хвои 1.3-6.09%; веточек сосны – 2.74-9.76%. Можно ли аналогично дыму, принять, что % потерь тепла равен % остающегося углерода (от массы сухого образца). Видимо, это будет неверным, т.к. потери тепла будут вызываться недожогом не только до коксика, но и до множества других продуктов. Кроме того, это невозможно и по чисто логическим причинам. Ведь содержание углерода во мху Шребера составляет 49.6% (см., например, табл. 2.4 в [Гришин, 1992, с. 136]), следовательно, если углерод вообще не будет окисляться и весь перейдет в коксик, то от массы сухого образца он составит именно 49.6%, а величина в 70.4% достигнута быть не может (но вот по потерям тепла может иметь место любой недожог, хоть бы и 100%, если мох совсем не сгорел). С другой стороны, ограничить величину  $\alpha$  только % сажи в дыму мы тоже не можем, ибо тогда это придет в противоречие как со здравым смыслом, так и с утверждением

<sup>27</sup> Эти авторы приводят, кроме того, экспоненциальную эмпирическую формулу для возрастания  $S_f$  год от года. Но остается неясным – реальная ли это динамика (и тогда в качестве  $S_f$  для наших расчетов лучше взять среднее значение) или это динамика кажущаяся, обусловленная в более поздние годы лучшим учетом пожаров в связи с прогрессом технических (спутниковых) средств наблюдения (тогда надо брать не среднее, а максимальное значение).

<sup>28</sup> Валендик Э.Н., Гевель Н.Ф. Полнота горения некоторых лесных горючих материалов // Проблемы лесной пирологии. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1975. С. 127-137.

Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука. 239 с. – Все цит. по [Гришин, 1992, с. 137-138, 191-192].

Е.А. Ваганова и др. [2005, с. 643] о *значительной* части углерода, осаждающегося в практически не разлагающейся форме, ибо 1.4% вряд ли кто-то назовет «значительной частью».

В реальных условиях тепловые потери будут больше, чем в лабораторных, из-за флуктуаций полей температуры во фронте пожара [Гришин, 1992, с. 139] и, возможно, из-за недостатка кислорода в отдельных зонах пожара. Но вот насколько больше? И какая часть этих потерь соответствует образованию сажи (и других практически не разлагающихся форм углерода)? В результате обзора различных литературных источников Fumiharu Soito<sup>29</sup> установил, что суммарная масса частиц дыма, возникающих при лесных пожарах, составляет 1-5% первоначальной массы лесных горючих материалов. И хотя дым состоит из частиц сажи и частиц золы, А.М. Гришин [1992, с. 185] считает допустимым пренебречь последними и отнести все эти (3±2)% на счет сажи. Если перейти от абсолютно сухого вещества к углероду (например, воспользовавшись химической формулой C<sub>6</sub>H<sub>9</sub>O<sub>4</sub>, как мы это сделали выше) то в результате получим, что при лесных пожарах (6±4)% углерода древесины переходит в частицы сажи дыма. Это же подтверждается данными из [Моисеев и др., 1985, с. 124]: из-за недостатка притока кислорода при горении лесов образуется в 4 раза больше элементарного углерода, чем при сжигании древесины в лабораторных условиях и в специальных печах. Действительно, 4·1.4% = 5.6%, т.е. приблизительно 6%<sup>30</sup>.

Поскольку кроме дымовой сажи во время пожара, безусловно, будут образовываться и другие недогоревшие остатки, то полученную оценку для  $\alpha$  (0.06±0.04) следует считать оценкой снизу. Но можно получить и оценку сверху – для пиролиза.

Пиролиз (разложение лесных горючих материалов в результате их нагревания) играет огромную роль при распространении лесных пожаров. В результате пиролиза возникают газообразные и конденсированные продукты. К первым относятся H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. К конденсированным продуктам пиролиза относятся твердый пористый коксовый остаток (древесный уголь) который состоит из почти чистого углерода, и жидкие продукты (жижка), в которые входит вода и различные органические соединения (смола, спиртовые продукты, кислоты) [Гришин, 1992, с. 175]. Спирты и органические кислоты, конечно, будут довольно быстро разлагаться микробами, но некоторые смолы, вероятно, можно считать очень медленно разлагающимися формами углерода. Тем не менее, мы пренебрежем этим и сосредоточим внимание только на коксике.

Согласно Н.И. Никитину и Гришину с соавт.<sup>31</sup>, состав продуктов пиролиза несколько меняется в зависимости от горючего материала. При этом (в % от массы абсолютно сухого вещества) содержание коксика составляет от 24.2% (для хвой сосны) до 37.8% (для мха Шребера). Если усреднить все данные, приводимы в табл. 2.24 А.М. Гришиным [1992, с. 181], то получим (32.3 ± 2.1)%<sup>32</sup>. Согласно Б.Н. Уголеву<sup>33</sup>, коксик (углеродистый остаток) состоит из чистого углерода (80-97%) и золы, поэтому полученное значение надо домножить на 0.885±0.085. Кроме того, необходимо перейти от абсолютно сухого вещества к углероду (например, воспользовавшись химической формулой C<sub>6</sub>H<sub>9</sub>O<sub>4</sub>, как мы это сделали выше). В результате будем иметь: 0.578±0.093.

<sup>29</sup> Fumiharu Soito. Smoke generation from building materials // 15<sup>th</sup> Sympos. (Intern.) Combust. Tokyo, 1974. Pittsburgh, 1974. P. 269-278. – Цит по [Гришин, 1992, с. 184, 194].

<sup>30</sup> Наконец, можно воспользоваться еще одной косвенной информацией. При моделировании лесных пожаров, которые могут возникнуть в результате ядерной войны, принимается, что массовая доля аэрозоля, выброшенного в атмосферу, составит 0.05÷0.1 от сгоревшей в этих пожарах биомассы, причем элементарный углерод составит около 27% массы аэрозоля [Моисеев и др., 1985, с. 123-124]. Учитывая эти величины и воспользовавшись химической формулой лесных горючих материалов (C<sub>6</sub>H<sub>9</sub>O<sub>4</sub>), получим оценку для  $\alpha$  на уровне 0.04±0.01.

<sup>31</sup> Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1972. 712 с.

Гришин А.М., Голованов А.Н., Перминов В.А. Разработка инженерных программ для расчета на ЭВМ энергетических и кинематических параметров фронтов лесных пожаров: (Отчет по НИР «Лес») Том. ун-т. Томск, 1990. 230 с. – Все цит по [Гришин, 1992, с. 181, 193].

<sup>32</sup> Для расчета доверительного интервала мы задали доверительную вероятность 90%.

<sup>33</sup> Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 231 с. – Цит. по [Гришин, 1992, с. 138, 191].

Итак, мы имеем для  $\alpha$  оценки снизу и сверху:  $(0.06 \pm 0.04) \leq \alpha \leq (0.578 \pm 0.093)$ . Оценка снизу получена в предположении того, что не разлагающийся элементарный углерод, образующийся в результате пожара, – это только частицы дымовой сажи. А оценка сверху получена в предположении того, что имеет место только пиролиз, но не горение. Реальное значение  $\alpha$  находится где-то между этими оценками, причем на основании работы [Andreae and Merlet, 2001] можно предположить, что оно будет ближе к нашей минимальной оценке.

Поэтому для дальнейших расчетов примем  $\alpha \approx 0.1$ . Вероятно, 10%-ная доля (в сравнении с исходными 50%, о которых ведут речь Е.А. Ваганов и др. [2005, с. 643]) уже может считаться «значительной». С другой стороны, выбранное значение весьма близко к «оценке снизу», так что мы можем быть почти уверены, что не завысим поток «неразлагающегося пожарного углерода».

Получаем для этого потока:  $F_f \approx 10^{-1} \cdot 6.4 \cdot 10^{-12} \cdot 1.8862 \cdot 10^{11} \approx 0.12$  ГтС/год (кстати, возможно подобный расчет будет более правильно провести не только для площади лесов бореального и умеренного пояса, как мы это сделали выше, но и для площади, занимаемой редколесьями и кустарниками). И тут возникает следующий вопрос: если такое большое количество элементарного углерода выводится в земные и водные экосистемы, то какие проявления этого мы должны видеть? Конечно, многие из нас при закладке почвенных разрезов воочию наблюдали прослойки угольков, свидетельствующие о том, что когда-то в прошлом здесь бушевал пожар. Но если действительно каждый год в почве будет откладываться порядка 0.12 ГтС, то не превратится ли вся почва в сплошной угольный пласт? Попробуем посчитать. Обозначим через  $\rho$  (ГтС/м<sup>3</sup>) плотность древесного угля. Тогда (в среднем)<sup>34</sup> будет образовываться слой элементарного углерода толщиной

$$H = F_f / (\rho \cdot S) \text{ м/год.}$$

(здесь мы для простоты приняли, что этот углерод откладывается только на современной территории лесов). Усредняя значения плотности для нескольких видов древесного угля из [Бабищев, 1991, с. 122], получаем  $\rho = 4.65 \cdot 10^{-10}$  ГтС/м<sup>3</sup>. Таким образом,  $H = 0.12 / (4.65 \cdot 10^{-10} \cdot 6.2 \cdot 10^{12}) \approx 4 \cdot 10^{-5}$  м/год, т.е. 4 мм за век. Таким образом, часто встречающиеся в почвенных профилях прослойки угольков суммарной толщиной в несколько сантиметров вполне объясняют накопление элементарного углерода за многие столетия.

Причем, как известно, основными механизмами очищения атмосферы от пыли и аэрозоля являются гравитация и вымывание осадками. Частицы с размерами более 3 мкм осаждаются гравитацией в течение нескольких дней. Частицы с размерами более 0.1, но менее 3 мкм вымываются из атмосферы при помощи осадков, причем время жизни этого аэрозоля зависит от высоты его расположения. В интересующей нас нижней части тропосферы аэрозоль живет от 1 недели и дольше [Моисеев и др., 1985, с. 125]. Таким образом, вопрос о том, будет ли элементарный углерод сажи, образовавшейся над территорией России, откладываться именно на этой территории (и, тем самым, входить в углеродный баланс именно России) или он будет за несколько дней (а то и неделю!) вынесен за границу, в случае различных регионов и разных погодных условий будет решаться по-разному. Кроме того, некоторая часть «пожарного» углерода, отложенного на территории России, будет в результате эрозии вымываться в реки и выноситься с территории России, что было уже учтено выше.

В общем, получается, что очевидные факты, вроде бы, не противоречат высказанной гипотезе. Впрочем, может быть, ей противоречат какие-то более глубокие наблюдения? Не знаем... Как мы уже говорили, мы не являемся специалистами в этом вопросе. И очень хотелось бы услышать мнение специалистов...

#### А что пишут классики?

4) А.В. СМАГИН: «Но как показывают работы К.И. Кобак [1988] и А.В. Наумова [2004], распространенные в России лесные и болотные экосистемы достаточно автономны по круговороту углерода и используют свой же эмитированный CO<sub>2</sub>».

ОТВЕТ: А как конкретно они это показывают? Почему проф. Смагин не приводит более четких указаний – авторских цитат или хотя бы номера тех страниц, где читатель сможет найти подтверждение

<sup>34</sup> Понятно, что в каждой конкретной географической точке много лет никакого «пожарного» элементарного углерода откладываться не будет, поскольку в эти годы не будет пожаров, а потом сразу (после наконец-то произошедшего пожара) отложится, например, сантиметровой слой.

этой мысли. Да и потом, что значит «достаточно автономны»? Все-таки не совсем автономны? Но раз хотя бы немного не автономны, то это и означает, что лесные и болотные экосистемы все-таки аккумулируют какое-то количество углекислоты из атмосферы над территорией России, а не только используют свой же эмитированный CO<sub>2</sub>. Давайте разбираться – что в действительности написано в процитированных Андреем Валентиновичем работах. Сразу оговорим, что, возможно, какие-то места этих двух выдающихся работ мы прочли невнимательно, что-то упустили. Но то, что мы нашли в них, тоже нельзя сбрасывать со счетов. И начнем мы с [Наумов, 2004].

Количественные оценки потоков углерода в экосистемах, исследованных Алексеем Владимировичем, сведены им в табл. 7 (с. 31 автореферата). Из этой таблицы ясно видно, что **во всех случаях имела место ассимиляция углерода!** Далее автор строит математическую модель потоков углерода в болотных экосистемах на основании которой приходит к следующему важному заключению: «...время выхода болотной экосистемы... на квазистационарное значение... составит около 17690 лет». Тогда «при возрасте голоцена в 10000 лет» (как указывает сам А.В. Смагин), мы все еще должны, согласно этой модели, иметь нетто-сток углерода в эти торфяники, причем будем иметь его еще в течение 7690 лет.

Но, собственно говоря, даже если мы что-то упустили в тексте автореферата, очевидно, что это не столь важно, если автор четко сформулировал выводы. К счастью, Алексей Владимирович не поленился это сделать. И вот, например, Вывод № 5 (с. 34): «Для болот в условиях лесной зоны Западной Сибири имеет место общая тенденция увеличения нетто-ассимиляции углерода... в направлении с севера на юг». Из этого вывода с очевидностью следует, что **в данной диссертации для болотных экосистем, как раз-таки, установлено наличие нетто-ассимиляции углерода** (которая, к тому же, еще и увеличивается к югу)! А что же относительно автономности круговорота углерода в этих экосистемах? В отличие от проф. Смагина, Алексей Владимирович не пользуется качественными приблизительными терминами типа «достаточно автономны», а с гениальной ясностью дает почти что четкую количественную характеристику (Вывод № 7 на с. 35): «Специфической особенностью биологического круговорота углерода болотных экосистем является наличие малого внутреннего цикла, за счет функционирования которого формируется более 60% чистой первичной продукции». Вот оно оказывается что! Такова эта «достаточная автономность» круговорота углерода: только где-то 60-70%<sup>35</sup> углерода «крутится» внутри болотной экосистемы. А оставшиеся более 30%? Ну откуда же им взяться, как не из атмосферы!? Что же, с [Наумов, 2004] все ясно – эта работа **не подтверждает утверждение проф. Смагина, а, скорее, свидетельствует прямо против него**. Но обратимся теперь к [Кобак, 1988] – может быть там мы найдем что-нибудь интересное?

Прежде всего очевидно, что Кира Ивановна весьма критически относится к тому состоянию глобальной экологии, в котором она пребывала 30 лет назад, когда, собственно говоря, и писалась книга. Так, на с. 3 читаем: «Суждения о роли биоты в увеличении концентрации CO<sub>2</sub> в современной атмосфере чрезвычайно противоречивы, и эта проблема остается дискуссионной до сих пор... Количественные оценки годового нетто-потока углерода между наземными экосистемами и атмосферой немногочисленны и настолько противоречивы, что до сих пор дискутируется вопрос даже не о величине, а о знаке этого потока, т.е. не ясно, является ли биота в конечном итоге источником или стоком для атмосферного CO<sub>2</sub>». Однако смелая ученая предпринимает героическую попытку данную проблему решить, избрав для этого такой показатель, как *NEP*, о котором (на с. 63-64) пишет: «*NEP* может быть представлена как разность<sup>36</sup> между чистой первичной продуктивностью и дыханием гетеротрофов... *NEP* является очень важной характеристикой экосистемы, так как именно на основании этой величины можно определить характер функционирования экосистемы... доминируют ли в ней процессы синтеза или деструкции... В стабильном сообществе вся общая первичная продукция расходуется на автотрофное и гетеротрофное дыхание и *NEP* крайне мала». А вот дальше – очень важно, поэтому – выделяем: «**Однако экспериментальных подтверждений этому практически нет**». И действительно, на следующей же странице Кира Ивановна приводит большую таблицу, содержащую экосистемы 7 лесов

<sup>35</sup> Думаем, менее 70%, иначе автор указал бы 70% непосредственно в выводе.

<sup>36</sup> В [Кобак, 1988, с. 64] обсуждается вопрос о неоднозначности выбора знака (положительного или отрицательного) для *NEP* при аккумулировании углерода в экосистеме. И в конце концов выбирается положительное значение для ситуации нетто-стока, а для тех экосистем, которые являются нетто-источником CO<sub>2</sub> – отрицательное.

(правда, ни одного – из России), прерии и тундры, причем **во всех случаях NEP свидетельствует о нетто-стоке углерода**. Справедливости ради отметим, что Кире Ивановне такая ситуация не нравится и она подвергает эту табл. некоторой критике, полагая, что так быть не должно. Ну, уж что есть – то есть (точнее говоря – что было в копилке экологических измерений 30 лет назад, ведь именно книгу такой давности порекомендовал нам Андрей Валентинович).

Процитируем еще одно место из [Кобак, 1988, с. 209]: «В лесных экосистемах умеренной зоны, где, как было сказано ранее, наблюдается рост лесных площадей и биомассы, также, возможно, с 1950 по 1980 г. имело место увеличение первичной продуктивности на  $0.68 \cdot 10^{12}$  кг С/год. В тропических же лесах она должна была уменьшиться...». И где расположена Россия? Так что должно было произойти с лесами на ее территории, согласно цитируемой проф. Смагиным К.И. Кобак? И еще один риторический вопрос: если лесные экосистемы, как утверждает проф. Смагин «используют свой же эмитированный  $\text{CO}_2$ », то могли бы они с 1950 по 1980 г. (в течение 30 лет!) увеличивать свою площадь и, главное – биомассу? Это же был бы вечный двигатель какой-то!

Впрочем, справедливости ради отметим, что замечание Андрея Валентиновича, процитированное нами выше под номером (4) можно интерпретировать так, что вовсе не рассуждения о чужих работах, а именно собственные исследования К.И. Кобак (также изложенные в [Кобак, 1988]) показывают: «распространенные в России лесные и болотные экосистемы достаточно автономны по круговороту углерода и используют свой же эмитированный  $\text{CO}_2$ ». Но действительно ли показывают?

Рассмотрим, например, собственные исследования Киры Ивановны, суммированные в табл. 2.7 «Баланс углерода в спелых сосновых насаждениях» и 2.8 «Баланс углерода в сосняках черничных разного возраста». Всего в этих таблицах приводятся данные для четырех сообществ, причем три из них функционируют как слабый нетто-сток углерода (!) и только одно – как слабый нетто-источник. По результатам этих исследований К.И. Кобак [1988, с. 70-71] сделала следующий вывод: «Изучение баланса углерода в лесных экосистемах показало (см. табл. 2.7, 2.8), что все спелые насаждения (сосняки возрастом 100-200 лет) независимо от типа леса характеризуются очень низкими положительными или отрицательными значениями *NEP* (от -2 до 0.4% *NPP*). В этих насаждениях гетеротрофное дыхание по величине практически равно первичной нетто-продуктивности и они не являются нетто-источником или нетто-стоком углерода из атмосферы». По нашему мнению, любому непредвзятому читателю очевидно: когда Кира Ивановна пишет «все спелые насаждения», то она имеет в виду не все спелые насаждения России, а все спелые насаждения, изученные в ее работе. И чтобы не было на этот счет сомнений, она уточняет «все спелые насаждения (сосняки возрастом 100-200 лет)». Подчеркнем, в табл. 2.7 их всего два, при этом одно выступило источником с  $NEP/NPP \approx -0.02$ , а второе – стоком с  $NEP/NPP = 0.004$ ; в табл. 2.8 приведены также два сосновые насаждения: одно – 95-летнее, однако все равно являющееся слабым стоком с  $NEP/NPP = 0.04$ , а второе – молодое, с  $NEP/NPP = 0.2$  – это, как видим, тоже сток, но гораздо мощнее. Разумеется, вдоль и поперек изучив указанные три сообщества, относительно них она имела полное право сделать совершенно определенный вывод о том, что «В этих насаждениях гетеротрофное дыхание по величине практически равно первичной нетто-продуктивности и они не являются нетто-источником или нетто-стоком углерода из атмосферы». Более того, чтобы, не дай Бог, не ввести невнимательного читателя в заблуждение (относительно «всех насаждений»), Кира Ивановна сразу после этой фразы разъясняет: «В молодых сосновых насаждениях *NEP* составляет 20% *NPP*... Такие экосистемы следует рассматривать как нетто-сток углерода из атмосферы».

Кстати, обратим внимание еще на одно обстоятельство. Выше, в разд. «Интенсивность стока углерода на территории России не постоянна» мы уже цитировали крайне важные слова К.И. Кобак [1988, с. 195-196] о том, что «Благодаря проведению интенсивных работ по лесовосстановлению... особенно после второй мировой войны леса умеренной зоны постепенно превращаются в нетто-сток углерода из атмосферы». После Второй Мировой войны прошло 70 лет. Значит, посаженные тогда леса еще не достигли возраста 100-200 лет, при котором они станут «ни рыбой, ни мясом» – ни нетто-источником ни нетто-стоком углерода из атмосферы. Следовательно, пока они все еще должны оставаться нетто-стоком. Так что мы очередной раз убедились: **если внимательно читать Киру Ивановну, то она, скорее, свидетельствует не за, а против утверждения проф. Смагина**.

Еще один пример (по-видимому, собственных исследований) К.И. Кобак [1988, с. 72] приводит на рис. 2.19. Пример этот относится к сосняку черничному (80 лет, III класс бонитета) и замечателен тем, что дается не какое-то одно или пусть даже несколько эпизодических измерений, а подробно



прорисована вся годовая динамика *NEP*. Из нее ясно видно, что хотя почти до конца апреля, а потом едва ли не с начала сентября данный сосняк функционирует как нетто-источник углерода, но с мая по август включительно он настолько мощно аккумулирует  $\text{CO}_2$ , что суммарно за год, безусловно, является нетто-стоком.

Кроме того отметим, что целая глава в [Кобак, 1988, 100-142] посвящена органическому углероду почвы. Но взяв оттуда информацию о работе почвы, как нетто-стока углерода, мы уже приводили выше в разд. «Тривиальные стоки могут фиксировать на территории России более 500 мегатонн углерода в год». Поэтому сейчас не будем повторяться.

Почему же проф. Смагин пишет, что «как показывают работы К.И. Кобак [1988]..., распространенные в России лесные и болотные экосистемы достаточно автономны по круговороту углерода и используют свой же эмитированный  $\text{CO}_2$ »? Разве в России распространены только сосняки возрастом 100-200 лет? Разве в России нет «молодых сосновых насаждений»? Ведь как раз *из работ [Кобак, 1988] следует, что некоторые (сосняки возрастом 100-200 лет) достаточно автономны, а другие (молодые сосновые насаждения) следует рассматривать как нетто-сток углерода из атмосферы.*

### О «гипотезе артефакта»

5) А.В. СМАГИН: «Не логичнее все же принять гипотезу артефакта и попытаться проанализировать породившие ее причины? Одна из них очевидна – очень малое количество данных по дыханию почв для плохо изученных регионов Сибири и Дальнего Востока (всего 12 точек в пределах от 100 до 180°Е, составляющих почти половину протяженности страны), согласно [Курганова, 2010]».

ОТВЕТ: Если говорить о конкретной базе данных, то, безусловно, Андрей Валентинович прав, что в ней оказалось не слишком много точек в пределах от 100 до 180° в.д. (хотя, собрав даже такое количество данных, да плюс еще множество – в полосе от 20 до 100° в.д. – Ирина Николаевна Курганова все равно совершила, можно сказать, научный подвиг). Но очередной раз повторю, что многие современные оценки углеродного баланса основываются не столько на этой базе данных, сколько на МОЗ, использующем либо региональные сети микрометеорологических измерений (осуществляемых МеМиП или другими методами), либо данные дистанционного зондирования атмосферного поля концентраций газов со спутников. Так что *если рассматривать «гипотезу артефакта», то ошибки надо искать и в микрометеорологических измерениях, и в спутниковых данных.*

6) А.В. СМАГИН: Вторая – использование в большинстве случаев «классического» метода камер с абсорбцией  $\text{CO}_2$ , который может существенно занижать оценку эмиссии, как впрочем и метод камер вообще.

ОТВЕТ: Выше, приводя оценки разных авторов, мы специально старались привести те работы, в которых использовался не метод камер, который действительно вызывает множество нареканий, а МиМ (подчас реализованные в виде региональных сетей) или МОЗ на основе спутниковых данных глобального охвата.

### Заключение

По сути дела, наша позиция – промежуточная между позициями Ирины Николаевны Кургановой и Андрея Валентиновича Смагина (и, по сути дела, немного ближе к первой).

- Ирина Николаевна Курганова [2010] оценила баланс углерода на территории России на момент 2005-2006 гг. величиной  $0.9 \pm 0.45$  ГтС/год, а не просто 1 Гт/год, как пишет проф. Смагин.

- Величины близ нижней границы этой оценки (т.е. около 0.45 ГтС/год) оказываются в хорошем соответствии с современными оценками многих других исследователей, использовавших разнообразные методы (а не только один лишь камерный метод, который совершенно справедливо критикует Андрей Валентинович) и наборы данных, в том числе и глобальное спутниковое картирование пространственно-временной динамики поля  $\text{CO}_2$ .

- Если такая (все равно достаточно высокая!) интенсивность стока углерода в настоящее время на территории России является фактом, то отсюда вовсе не следует, что она была такой же всегда, поэтому нет никакого смысла, как это делает проф. Смагин, пытаться доказать несостоятельность данной оценки простейшим экстраполированием ее на все послеледниковое время. Экспериментальные данные и

теоретические исследования показывают, что интенсивность стока углерода является величиной переменной.

- Однако надо четко понимать, что изъятие 450 МтС/год из атмосферы над территорией России, не означает, что именно столько углерода будет именно на этой территории захоронено (и в этом смысле Андрей Валентинович прав). В частности, 70-76 МтС в виде растворенного и нерастворенного органического и неорганического вещества ежегодно с территории России могут выносить реки. Еще примерно 16 МтС/год уходит в атмосферу в виде метана.

- Захоронение различных форм углерода с интенсивностью 50 МтС/год в болотах + 110 МтС/год в виде гумуса (всех почв, кроме болот) + 120 МтС в виде элементарного «пожарного» углерода, как видим, объясняет уже 280 из 450 МтС/год. Не забудем и примерно 90 МтС/год, выносимые в форме «не-СО<sub>2</sub>» – см. предыдущий пункт. Оставшиеся 80 МтС/год вполне можно объяснить за счет прироста растительности.

- Автореферат диссертации Алексея Владимировича Наумова и книга Киры Ивановны Кобак, на которые в поисках поддержки ссылается проф. Смагин, на самом деле свидетельствуют о том, что распространенные в России лесные и болотные экосистемы являются нетто-стоками углерода, используя не только свой же эмитированный СО<sub>2</sub>, но и в очень значительной степени (десятки процентов) СО<sub>2</sub> из атмосферы.

В свое время выдающийся физик Л.Б. Окунь [1988, с. 71-72] следующим образом определил условия достоверности результата: «Результат только тогда зачисляется в разряд достоверных, когда он получен независимо несколькими различными группами, использующими разные экспериментальные методики. Это условие совершенно необходимое, но еще не достаточное, стопроцентной гарантии оно не дает. Стопроцентная<sup>37</sup> гарантия появляется тогда, когда явление перестает лежать на переднем крае науки, когда оно рутинно воспроизводится со статистикой событий, в тысячи и миллионы раз превосходящей ту, на основе которой было сделано открытие. Когда характеризующие явление величины становятся известны с несколькими десятичными знаками после запятой». Последнее указание совершенно четкое. Речь идет точности экспериментального определения количественных величин. Понятно, что в худшем случае 1 знак после запятой соответствует погрешности около ±10%: если, например, истинное значение равно 1.00, однако нам известен только первый «0», а второй знак не известен и он может быть равен 9, но тогда  $(1.09-1.00) \cdot 100\% / 1.00 = 9\%$ <sup>38</sup>. Два известных после запятой знака соответствуют относительной погрешности 1%, а несколько знаков – это не хуже 0.1%.

***Что же мы имеем в области решения вопроса об аккумуляции углерода территорией России? Необходимое условие выполнено – результат получен независимо несколькими различными группами, использующими разные экспериментальные методики. Это вселяет в нас надежду, что результат окажется истинным. Однако надо отдавать себе ясный отчет в том, что это, к сожалению, пока только надежда. Сейчас еще мы не имеем права быть уверенными в полученном результате, ибо к настоящему времени он не получен «с несколькими десятичными знаками после запятой», т.е. с точностью не хуже 0.1%.***

---

<sup>37</sup> Строго говоря, Лев Борисович не прав. Гарантия все-таки не стопроцентная – ведь дальше он сам пишет о том, что результат должен воспроизводиться со статистикой событий, всего лишь «в тысячи и миллионы раз превосходящей ту, на основе которой было сделано открытие», а вовсе не в бесконечное число раз. Этим «тысячам и миллионам раз», с точки зрения математической статистики, будет соответствовать очень высокая, но все-таки не стопроцентная гарантия. А стопроцентная гарантия вообще не достижима, поскольку формально она соответствует вовсе не миллионам и даже не миллиардам, а бесконечному числу раз.

<sup>38</sup> Мы только что говорили о 10% по совершенно очевидной причине. Если нам не известен второй знак, то тем более не известен третий, а тогда в худшем случае получаем:  $(1.099-1.000) \cdot 100\% / 1.000 = 9.9\%$ . Аналогично можно вовлечь в рассмотрение четвертый знак, получив 9.99%. И так далее. В пределе будем иметь 10%.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бабичев А.П. 1991. Плотность веществ // Физические величины. Справочник / Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.). М.: Энергоатомиздат. С. 375-390.
- Бажин Н.М. 2000. Метан в атмосфере // Соросовский образовательный журнал. Т. 6. № 3. С. 52-57.
- Ваганов В.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. 2005. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. №4. С. 631-649.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2009. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Aa2) для Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 3. С. 77-81.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. 2010. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера. Томск: Изд-во ТГПУ. 104 с.
- Глаголев М.В., Филиппов И.В. 2011. Инвентаризации поглощения метана почвами // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 2. № 2 (4). С. 1.
- Глаголев М.В., Филиппов И.В., Кривенок Л.А., Максютов Ш.Ш. 2014. Оценка потока CH<sub>4</sub> из почв России набором простейших моделей // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Четвертого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 4-17 августа 2014 г.) / Под ред. А.А. Титляновой и М.И. Дергачевой. Томск: Изд-во Том. Ун-та. С. 163-165.
- Гришин А.М. 1992. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука. 408 с.
- Добровольский Г.В., Урусевская И.С. 2004. География почв. М.: Изд-во МГУ, Изд-во «КолосС». 460 с.
- Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П. 2002. Пирогенная и гидротермическая деградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: Изд-во МГУ. 168 с.
- Йонас М., Нильссон С., Швиденко А., Столбовой В., МакКаллум И. 2003. Сравнительный анализ результатов полного углеродного бюджета России с данными инверсного моделирования для внетропической зоны Северного полушария // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пущино. С. 55-56.
- Кароль И.Л., Киселев А.А. 2013. Парадоксы климата. Ледниковый период или обжигающий зной? М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА. 288 с.
- Кобак К.И. 1988. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат. 248 с.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. 2004. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: ФИЗМАТЛИТ. 336 с.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. 2003. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. М.: Логос. 576 с.
- Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Герену В.О., Уткин А.И. 2007. Пули и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука. 315 с.
- Курганова И.Н. 2010. Эмиссия и баланс диоксида углерода в экосистемах России: Автореферат дис. ... докт. биол. наук. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ). 36 с.
- Лебедев В.С., Иванов Д.В., Телешева С.Ю., Соловьев А.В. 2008. Интенсивность образования биогаза в захороненных твердых бытовых отходах и осадках сточных вод // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 4. С. 350-358.
- Малахова В.В., Голубева Е.Н. 2011. Роль речного стока в увеличении концентрации растворенного метана в водах восточно-сибирского шельфа // Девятое сибирское совещание по климатологическому мониторингу: Мат-лы рос. конф. / Под. ред. М.В. Кабанова. Томск: "Аграф-Пресс". С. 146-148.
- Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. 1985. Человек и биосфера. М.: Наука. 272 с.
- Наумов А.В. 2004. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности: Автореферат дисс. ... докт. биол. наук. Томск. 37 с.
- Нильссон С., Швиденко А., Столбовой В., МакКаллум И., Йонас М. 2003. Полный углеродный бюджет наземных экосистем России в 1988-2002 // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пущино. С. 88-89.
- Ножевникова А.Н. 1995. Мусорные залежи – «метановые бомбы» планеты // Природа. №6. С. 14-25.
- Окунь Л.Б. 1988. Физика элементарных частиц. М.: Наука. 272 с.
- Прохоров А.М. (ред.) 1983. Советский энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия. 1600 с.
- Родос В. 2008. Правила дискуссии и уловки спора. М.: Идея-Пресс. 232 с.
- Румшиский Л.З. 1971. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука. 192 с.
- Рысков Я.Г., Рыскова Е.А., Кудеяров В.Н. 2004. Вынос свободной растворенной углекислоты реками с территории России // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии / Под ред. акад. Н.П. Лаверова. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН. С. 141-146.
- Рысков Я.Г., Рыскова Е.А., Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А. 2003. Сток свободной углекислоты с северными реками // Вторая Международная конференция «Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии», 16-20 июня 2003: Тезисы докладов. Пущино. С. 99.
- Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. 2003. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // Вестник МГУ, сер. Почвоведение. №3. С. 29-36.

- Шибистова О.Б., Ллойд Д., Колле О., Арнет А., Чебакова Н.М., Золотухин Д.А., Зражевская Г.К., Шульце Э.-Д. 2002. Оценка аккумуляции CO<sub>2</sub> основным древостоем методом микровихревых пульсаций // Доклады академии наук. Т. 383. № 3. С. 425-429.
- Amon R.M.W., Rinehart A.J., Duan S., Louchouart P., Prokushkin A., Guggenberger G., Bauch D., Stedmon C., Raymond P.A., Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Walker S.A., Zhulidov A.V. 2012. Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V. 94. P. 217-237.
- Andreae M.O., Merlet P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 15. No. 4. P. 955-966.
- Andronova N.G., Karol I.L. 1993. The contribution of USSR sources to global methane emission // *Chemosphere*. V. 26. P. 111-126.
- Bergamaschi P., Frankenberg C., Meirink J.F., Krol M., Dentener F., Wagner T., Platt U., Kaplan J.O., Körner S., Heimann M., Dlugokencky E.J., Goede A. 2007. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations // *J. Geophys. Res.* V. 112. D02304.
- Brown M. 1993. Deduction of Emissions of Source Gases Using an Objective Inversion Algorithm and a Chemical Transport Model // *Journal of Geophysical Research*. V. 98. No. D7. P. 12639-12660.
- Budishchev A., Mi Y., van Huissteden J., Belelli-Marchesini L., Schaepman-Strub G., Parmentier F.J.W., Fratini G., Gallagher A., Maximov T.C., Dolman A.J. 2014. Evaluation of a plot scale methane emission model at the ecosystem scale using eddy covariance observations and footprint modelling // *Biogeosciences Discuss.* V. 11. P. 3927-3961. DOI: 10.5194/bgd-11-3927-2014. URL: [www.biogeosciences-discuss.net/11/3927/2014/](http://www.biogeosciences-discuss.net/11/3927/2014/)
- Chevallier F., Palmer P.I., Feng L., Boesch H., O'Dell C.W., Bousquet P. 2014. Towards robust and consistent regional CO<sub>2</sub> flux estimates from in situ and space-borne measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> // *Geophysical Research Letters*. V. 41. No. 3. P. 1065-1070. DOI: 10.1002/2013GL058772
- Connolly J., Roulet N.T., Seaquist J.W., Holden N.M., Lafleur P.M., Humphreys E.R., Heumann B.W., Ward S.M. 2009. Using MODIS derived fPAR with ground based flux tower measurements to derive the light use efficiency for two Canadian peatlands // *Biogeosciences*. V. 6. P. 225-234. URL: <http://www.biogeosciences.net/6/225/2009/bg-6-225-2009.pdf> (дата обращения 19.12.2010).
- Dai A., Trenberth K.E. 2002. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // *Journal of hydrometeorology*. V. 3. №. 6. P. 660-687
- Dolman H., Shvidenko A. 2013. The carbon balance of Russia // EGU General Assembly 2013, held 7-12 April, 2013 in Vienna, Austria, id. EGU2013-1888. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..15.1888D> (дата обращения 11.05.2013).
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. 2011. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // *Environmental Research Letters*. V. 6. N. 4. P. 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
- Kim H.-S., Maksyutov S., Glagolev M.V., Machida T., Patra P.K., Sudo K., Inoue G. 2011. Evaluation of methane emissions from West Siberian wetlands based on inverse modeling // *Environmental Research Letters*. V. 6. N. 3. 035201. DOI 10.1088/1748-9326/6/3/035201
- Lapshina E.D., Schulze E.-D., Filippov I.V., Kuhlmann I. 2014. The downward movement of dissolved organic carbon exists in the boreal peatlands of West Siberia // *Proceedings of the Fourth International Field Symposium (Novosibirsk, August 4-17, 2014)* / Ed. by Prof. A.A. Titlyanova and Prof. M.I. Dergacheva. Tomsk: Publishing house of Tomsk University. P. 145-147.
- Lobbes J.M., Fitznar H.P., Kattner G. 2000. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V. 64. No. 17. P. 2973-2983.
- Mikaloff-Fletcher S.E., Tans P.P., Bruhwiler L.M., Miller J.B., Heimann M. 2004. CH<sub>4</sub> sources estimated from atmospheric observations of CH<sub>4</sub> and its <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C isotopic ratios: 2. Inverse modeling of CH<sub>4</sub> fluxes from geographical regions // *Global Biogeochem Cycles*. V. 18. GB4005.
- Nozhevnikova A., Glagolev M., Nekrasova V., Einola J., Sormunen K., Rintala J. 2003. The analysis of methods for measurement of methane oxidation in landfills // *Water Science and Technology*. V. 48. Issue 4. P. 45-52.
- Rozanov A.B. 1995. Methane Emission from Forest and Agricultural Land in Russia // WP-95-31. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. 2010. Annual variation of methane emissions from forested bogs in West Siberia (2005-2009): A case of high CH<sub>4</sub> and precipitation rate in the summer of 2007 // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. V. 10. No. 11. P.27759-27776.
- Stein R., Fahl K., Fiitterer D.K., Galimov E.M., Stepanets O.V. 2003. Dissolved organic matter (DOM) in the estuaries of Ob and Yenisei and the adjacent Kara Sea, Russia. Siberian River Run-Off in the Kara Sea: Characterisation, Quantification, Variability and Environmental Significance, 6. P. 281.
- Zelenev V.V. 1996. Assessment of the Average Annual Methane Flux from the Soils of Russia // WP-96-51. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Zhu X., Zhuang Q., Qin Z., Glagolev M., Song L. 2013. Estimating wetland methane emissions from the northern high latitudes from 1990 to 2009 using artificial neural networks // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 27. Issue 2. P. 592-604.

## A REPLY TO A.V. SMAGIN: II. CARBON BALACE OF RUSSIA

*Glagolev M.V., Sabrekov A.F.*

*As an answer to the remark of A.V. Smagin about the disbalance of the carbon cycle for ecosystems on the territory of Russia and the possible reasons of this phenomenon revision of carbon balance based on published data was conducted. The incoming flux - the net ecosystem exchange - estimated by various authors is about 0.45 GtC/year. This value is in a good agreement with estimates of carbon uptake by terrestrial ecosystems of the northern hemisphere done by inverse modeling. As outcoming fluxes carbon sinks through the rivers (70-76 MtC/year), net methane flux to the atmosphere (16 MtC/year), carbon sequestration in the form of peat in wetlands (50 MtC/year) and in the form of humus in soils (110 MtC/year), as well as deposits formed during fires in natural ecosystems (120 MtC/year) are considered. The difference between incoming and outcoming fluxes is about 80 MtC/year, and according to the literature data it is possible to accept this value as a biomass growth of natural ecosystems on the territory of Russia.*

**Key words:** inventory, dissolved carbon, methane, peat, soil carbon, carbon released from forest fires.

Поступила в редакцию: 15.10.2014  
Переработанный вариант: 21.10.2014