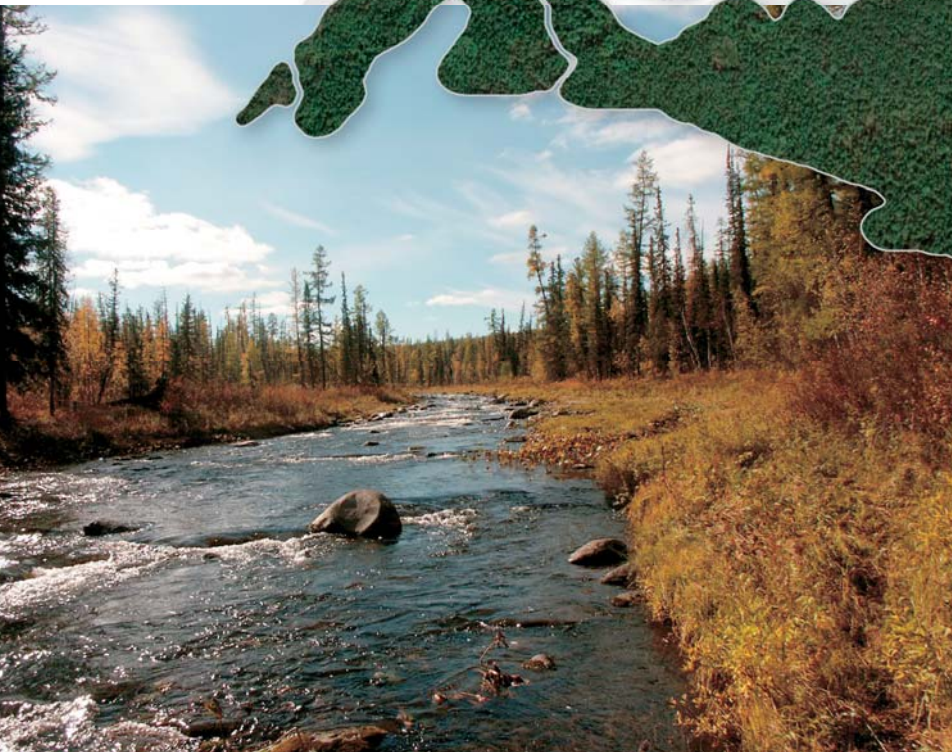


В. И. ХАРУК, К. ДЖ. РЭНСОН

Тайга под прищмотром

лидара



Сибирские леса – большая и лучшая часть не только российских лесов, но и всего бореального пояса Земли. Но проводить наземный мониторинг лесных массивов Сибири непросто из-за больших размеров, удаленности и труднодоступности многих из них.

Однако «следить» за лесами необходимо, ведь наши леса, в отличие от тропических, являются зоной «стока» углерода, его аккумуляции. Углерод накапливается здесь в стволах, почве, корнях, торфяниках... В этом смысле сибирские леса служат для биосферы настоящей «буферной емкостью», смягчающей рост концентрации углекислого газа – одного из основных «парниковых» газов.

ХАРУК Вячеслав Иванович — доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом экологии и мониторинга леса Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Красноярск), заведующий кафедрой ГИС в Сибирском федеральном университете (Красноярск). Научные интересы: природная и антропогенная динамика лесных экосистем

РЭНСОН К. Джон – руководитель отдела биосферных исследований Годдардовского космического центра NASA. Научные интересы: применение дистанционного зондирования для моделирования лесных экосистем, в том числе бореальных лесов. Научный руководитель проектов Terra и LiDAR (программа DESDynI)



Леса бореальной зоны – это одна треть всех лесов планеты, включая более двух третей хвойных. В Азии их южная граница доходит до Китая и Монголии, в Америке – опускается до Великих Озер; самый северный «лесной остров» Ары-Мас расположен на п-ове Таймыр. В бореальных лесах, около 60% которых приходится на долю России, сосредоточена почти половина мировых запасов древесины. Цифры впечатляют, но они приблизительны, так как получены на основе неполных и устаревших сведений. Традиционные методы мониторинга лесов очень трудоемки, а экстраполяция данных космоснимков приводит к большим ошибкам при инвентаризации лесов. Но метод прямой оценки биомассы древостоев сегодня существует – это лазерное (лидарное) зондирование



Однако уже в текущем столетии северные ландшафты могут превратиться из зоны стока углерода в его источник: таежные леса – та часть планеты Земля, где наблюдается (и прогнозируется) максимальное потепление (IPCC, 2007). Региональные модели климата предсказывают дальнейшее повышение температуры «на северах», что повлечет таяние вечной мерзлоты, увеличение выбросов «законсервированных» в мерзлотном слое парниковых газов. В лесах высоких широт прогнозируется и уже наблюдается возрастание частоты лесных пожаров (Khauguk et al., 2008); возрастает вероятность возникновения новых очагов массового размножения насекомых-вредителей (численность, например, сибирского шелкопряда, на многих территориях пока лимитируется недостатком тепла).

Очевидно, что отслеживать явления, происходящие в наших лесах, включая контроль пула углерода и его составную часть – надземную биомассу древостоев, необходимо. Вот только как это сделать?

Мониторинг лесов

Мониторинг лесов предполагает проведение регулярных обследований. Однако на деле большая часть наших лесов ревизовалась десять и более лет назад. Для этих целей и сегодня используются известные еще с петровских времен наземные методы. Но они настолько трудоемки, что, например, в азиатской части России наземными методами учета лесного фонда охвачено не более половины всех лесов.

В ЛЕСУ РУБЯТ, А В МИР ЩЕПЫ ЛЕТАЮТ

Лесной фонд России сегодня включает собственно леса (776,1 млн га), временно не покрытые лесом территории (вырубки, гари, редины и т. д. – 107 млн га), а также лесные болота, пески, тундры и ряд других объектов, общая площадь которых составляет 296 млн га. Общая территория лесного фонда составляет примерно 70% всей территории России (Леса России, 2004). Преобладают хвойные породы (70%), самые распространенные из которых лиственница и сосна; на долю кедра приходится около 6% территории. Запас древесины в наших лесах составляет более 80 млрд м³, включая свыше половины мировых запасов древесины хвойных пород. Годичное депонирование углерода лесной растительностью России оценивается в 250 Мт при общем запасе примерно 35 Гт (Замолотчиков, 2004). Наши леса подвергаются различным нарушениям: рубкам, пожарам, воздействию насекомых-вредителей

и болезней и т. д. Так, заготовка древесины составляет 130–150 млн м³/год; причем доля незаконных рубок достигает 10–25%.

В целом ежегодно леса гибнут на территории от 0,2–1,0 млн га; причем основная причина гибели – пожары (50–70% площади погибших насаждений). Даже на охраняемой территории лесного фонда (это примерно 2/3 всех лесов) каждый год регистрируется от 15 до 35 тыс. лесных пожаров. Ущерб от пожаров (в «кубометрах» древесины) оценивается в половину объема рубок, однако в некоторые годы он может существенно превышать последний.

Площадь лесов, пораженных вредителями и болезнями, оценивается в 1–10 млн га/год. К счастью, как и в случае с пожарами, далеко не все пораженные леса погибают (Леса России, 2004)

На севере непогода корежит даже стойкую и неприхотливую лиственницу Гмелина. Но какова воля к жизни: наша лиственница падает, но не гибнет

Крона этой лиственницы помнит метели малого ледникового периода





В зоне Полярного круга под разреженным пологом лиственничников раскинулись заросли северного «винограда» — голубики

В 1970-х годах был разработан так называемый *фото-статистический метод* таксации лесов, предназначенный для обследования преимущественно отдаленных лесов. В основе его лежало использование аэрофотосъемки и снимков с отечественных спутников. Космоснимки дешифрировались по материалам спектральной аэрофотосъемки ключевых участков, площадь которых не превышала 5% от всей обследуемой территории. Это позволяло ограничиться небольшим объемом наземных обследований.

Арсенал дистанционного зондирования, применимый для исследований лесов, продолжал расширяться, хотя, к сожалению, не за счет отечественных разработок. Приборы, установленные на космических платформах, позволяли проводить зондирование поверхности в видимой, инфракрасной и микроволновой частях спектра с высоким разрешением. Однако полученные космоснимки обладали и серьезным недостатком: с помощью последних невозможно определить вертикальную структуру и высоту древостоев — ключевых параметров, необходимых для оценки наземной биомассы.

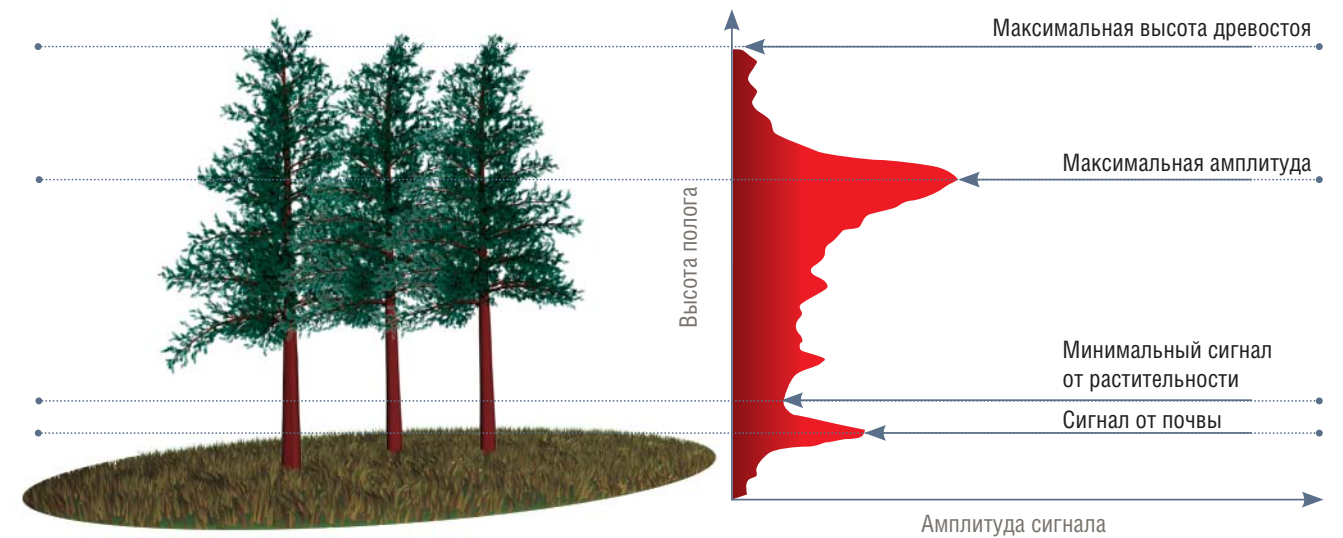
Эту задачу удалось решить лишь с помощью лазерного (лидарного) зондирования.

Основы лазерного зондирования лесов с борта самолета были заложены еще в СССР (Солодухин и др., 1977). Однако аэрофотосъемка стоит недорого; поэтому современное дистанционное зондирование выполняется с космических платформ.

Всевидящее око

С помощью лазерного зондирования системой GLAS удастся напрямую измерять морфологические признаки древостоев: отраженный лазерный сигнал несет информацию о вертикальной структуре леса. Затем, используя аллометрические соотношения, можно вычислить средние диаметры стволов. На основе всех этих данных определяют запас древесины и величину наземной биомассы.

Но полученные результаты имеют характер точечных оценок. Для интерполяции на большую лесную территорию необходима карта, на которой отображены



Типичная форма отраженного лазерного импульса («волновая форма»), полученная с помощью лазерной системы GLAS. Параметры этой «волновой формы» позволяют установить вертикальную структуру древостоя

Система GLAS (Geosciences Laser Altimeter System), установленная на борту спутника ICESat (НАСА), изначально была предназначена для измерений высоты ледового покрова Земли. Однако технические характеристики GLAS позволили применить ее и для решения «лесных» задач (Lefsky et al., 2005; Nelson et al., 2009).

Основа GLAS — лазеры, работающие в зеленой (532 нм) и ближней инфракрасной (1064 нм) частях спектра. Лазеры периодически посылают импульсы продолжительностью 5 наносекунд вдоль траектории полета спутника. «Отпечатки» лидара на земной поверхности представляют пятна диаметром около 70 м, расстояние между которыми ~170 м.

Энтузиасты утверждают, что если прилечь на лужайку и терпеливо смотреть в небо, то можно увидеть зеленый импульс лидара. Впрочем, «зеленый луч» используется для исследований атмосферы; для изучения земной поверхности применяется ближнее инфракрасное излучение: в этом диапазоне меньше помех для зондирующего луча.

Данные GLAS — «волновые формы» — позволяют измерять объекты высотой до 80 м; очевидно, что в этот интервал укладываются все древостои бореальной зоны. Периодичность лидарной съемки заданной территории — около трех месяцев (Nelson et al., 2009). Основная задача исследователей заключается в том, чтобы связать показатели волновых форм с различными параметрами древостоев — высотой, вертикальной структурой, запасом древесины и биомассой

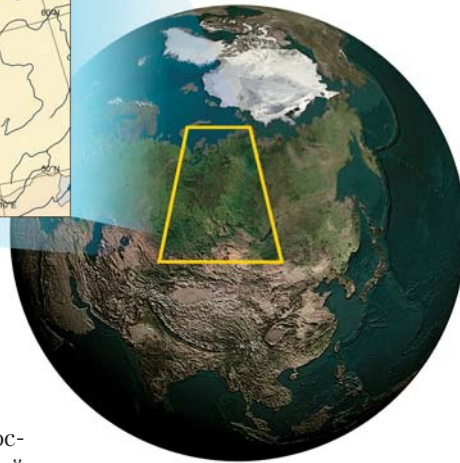
основные классы древостоев. Однако существующие на сегодня карты лесов устарели: так, наиболее цитируемая карта лесов СССР датируется 1991 г., а сами материалы, на основе которых она составлена, еще более «древние». Поэтому для обновления карты лесов была использована система Terra/MODIS — этот вид дистанционного зондирования специально ориентирован на исследования растительного покрова (Justice et al., 1998).

Сканер MODIS, установленный на космической платформе Terra, имеет 36 каналов, расположенных в видимой и инфракрасной частях спектра. Данные со спутника получают ежедневно (единственное ограничение — высокая облачность). Наземное разрешение (величина пикселя) составляет от 250 до 1000 м, полоса обзора — более 2300 км. Это позволяет использовать информацию с Terra/MODIS как для мониторинга, так и для обзорного картирования лесных территорий.

Снимки дешифрируют, используя данные по сравнительно небольшому числу «ключевых участков», на которых выполняются наземные обследования. В принципе для этой цели можно было бы использовать и данные инвентаризации лесов, периодичность которых должна составлять, согласно существующим нормативам, 10–20 лет. Однако по причинам экономического характера эти сроки не выдерживаются. Поэтому исследователям даже в наш космический век приходится самим восполнять пробелы в таксационных описаниях.

Сверху видно не все

Суть наземных исследований — сбор информации для калибровки данных космической съемки, для интерпретации «волновых форм» в терминах наземной биомассы. Задача «полевиков» — найти «отпечаток» лидара на лесной территории и определить в этом



Мониторинг лесов с помощью лидарного зондирования проводится по всему Енисейскому меридиану. На карте отмечена территория, о которой идет речь в данной статье

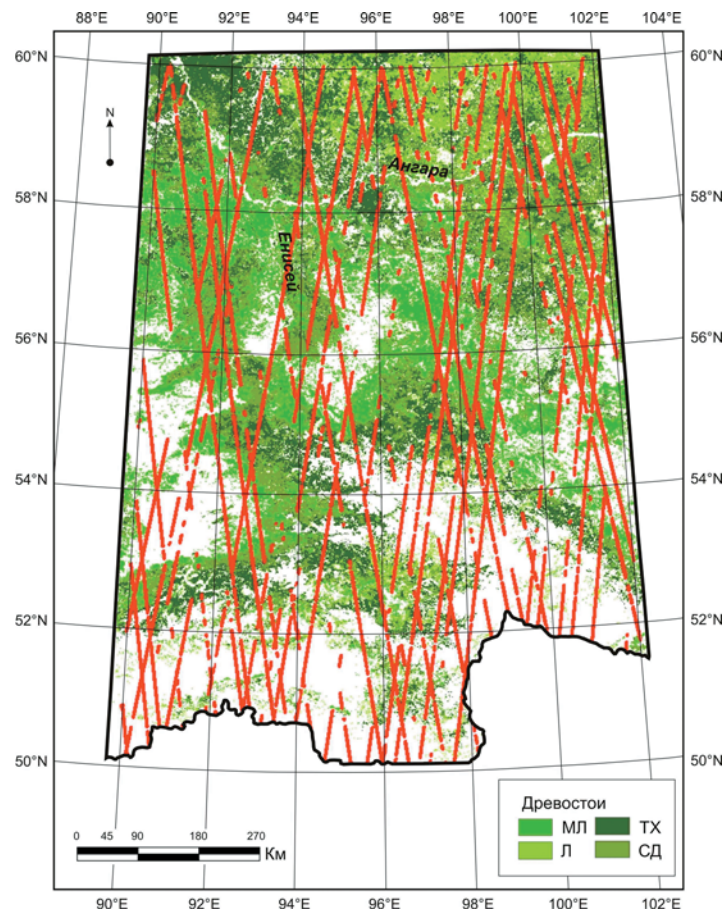
«Отпечатки лидара» (n = 114940) на фоне карты лесов, генерированной по снимкам MODIS с разрешением 500 м. СД – смешанные древостои, ТХ – «вечнозеленые» (сосна, кедр, ель, пихта) хвойные древостои, Л – лиственничники, МЛ – лиственные (береза, осина) древостои

месте основные параметры древостоя (средний возраст, породный состав, высоту и диаметры стволов и т. д.). Эти измерения необходимо дополнить описанием травяно-кустарничкового яруса и напочвенного покрова, общей характеристикой почв.

Поскольку каждый «след» лидарного импульса имеет конкретную координатную привязку, то отыскать «след» лидара в древостое, войти в него и произвести необходимые измерения можно, используя приборы геопозиционирования (GPS). Такие наземные работы и были проведены по всему Енисейскому меридиану – от «хребтов Саянских» до заполярной лесотундры – учеными Института леса им. Сукачева в рамках программы Сибирского отделения РАН и совместного проекта с NASA.

Строим карту

Чтобы закартировать надземную биомассу древостоев, нужно было установить взаимосвязи между параметрами волновых форм (отраженного лазерного излучения), полученных с помощью системы



GLAS, и характеристиками древостоев в пределах «следов» лидара, прежде всего, – с их средними высотами.

Для этого было использовано более 50 параметров лидарного сигнала (высота пиков, крутизна фронта, медиана сигнала и др.), из которых были выбраны шесть наиболее информативных. Всего в расчетах было использовано свыше 66 тыс. «следов» лидара!

В результате стало возможно оценивать запасы древесины, максимальные значения которых составляют около 600 м³/га. Отметим, что в этот диапазон «укладываются» практически все древостои Сибири (средний объем составляет около 100 м³/га). Конечно, в прежние времена можно было найти древостои с запасом до 900 м³/га (например, в кедровниках Западного Саяна), но сейчас запас даже в 150–200 м³/га считается достаточным для лесозаготовок.

Но получить локальные значения биомассы в пределах каждого следа лидара недостаточно для создания карты. Следующий этап – интерполяция этих «точечных» оценок на большие лесные территории, для чего требуется карта, отображающая основные типы леса и значения так называемого проективного покрытия («процента» лесистости).

И такая карта была создана на основе материалов съемки в видимой и ближней инфракрасной частях спектра, выполненной спектрорадиометром MODIS, а также цифровой модели рельефа. На карте отображены лиственные (береза, осина), «вечнозеленые» (сосна, кедр, ель, пихта), смешанные и лиственничные леса, представленные четырьмя градациями сомкнутости древостоя.

В итоге для каждого отпечатка лидара, наряду с надземной биомассой деревьев, были определены тип леса и лесистость (процент покрытой лесом территории).

Средние величины запаса, полученные по данным GLAS/MODIS, примерно на 12% превышают величины, полученные с помощью обычного наземного мониторинга (Shepashenko et al., 1998). Однако если пересчитать эти цифры на всю закартированную площадь лесов, то расхождение составит менее 2%.

Это свидетельствует, что лидарное зондирование можно с успехом применять для картирования надземной биомассы древостоев на субконтинентальном уровне, а также для оценки лесных ресурсов удаленных и труднодоступных регионов.



Кочечум – настоящая Угрюм-река эвенкийского севера

Из дневника экспедиции

28 июля. День «заброски» из Туры в лиственничники Заполярья. В отряде нас «напополам»: трое американцев и трое россиян. Это не первая совместная экспедиция: сотрудничество с Отделом биосферных исследований НАСА в Гринбелте началось в 90-х годах прошлого столетия.

...Ми-8 берет курс на верховья Кочечума. Над «точкой» – пелена облаков. Сквозь фонарь кабины просачиваются капли дождя. Второй пилот выбрасывает дымовую шашку – для ориентировки посадки.

30 июля. Дождь лил всю ночь. Особенность северных рек – резкое «гуляние» уровня воды. «Вечная мерзлота» не впитывает дождевую влагу, и она скатывается в реку, как в ванну. Уровень реки за сутки может подняться на 1–2 метра. Порою проснешься – а палатка в воде.



Встреча со старовеерами, поднимающимися на лодках в охотничьи угодья

09 августа. Дичи немного. Встречаются улепеты-ващие от лодки выводки уток, да попискивают разнокалиберные кулички. Вразвалочку, с достоинством из воды вылезают на берег северные гуси.

10 августа. Паша чистит карабин образца 1943 года. Тот не стреляет, т.е. стреляет, но однократно, и гильзы не выбрасывает. Глядя на старания Паши, Джон фаталистично замечает: «Ешьте меня, дикие звери. Я здесь, я один, и я безоружный».

А следы волков действительно встречаются. Впрочем, людоедов среди них не водится.

31 июля. При работе «на северах» оптимальный транспорт – лодка и вертолет. Для экономии горючего связали все три лодки «гуськом». До пункта возврата – Туры – верст 500.

01 августа. Кочечум в верховьях – река быстрая, дикая. Приходилось «нырять» в бурлящие воды, зажатые щеками утесов. По красе своей скалы просятся на полотно художника, по строению – напрашиваются на молоток геолога. На отмелях, на косах – разноцветье минералов.

02 августа. Находим по GPS «отпечатки» лидара. Измеряем высоты, диаметры, сомкнутость лиственниц. Другие виды здесь не выживают. Ольховник и выморочные березки не в счет. Да и лиственница здесь не простая, а Гмелина, превосходящая сибирскую по устойчивости к вымораживающим метелям. Красота лиственничников несравненна. Особенно по весне, накрывающей корявые ветки нежно-зеленым мазевом, и еще – после первых заморозков, когда лиственничники становятся золотистыми. Не береза, а лиственница – вот символ России!

03 августа. Прошли заброшенное стойбище. Навесной мостик через ложок, покосившиеся остовы жилищ, обветшавший загон для оленей; люди и олени куда-то ушли вслед за «перестройкой».

05 августа. Донимает гнус. Наша «Дэта», по признанию американцев, покруче заморских спреев. Наши «энцефалит-



Вечером палатка стояла метра на полтора выше уреза воды...

ки» тоже на высоте: вся команда в этой таежной униформе. Благо, что не жарко, а то в июле хочется спрятаться куда-то от незаходящего солнца. Уровень ФАР (фотосинтетически активной радиации) – как в Амазонии.

06 августа. Прошли Полярный круг. Джон пытается выйти в Интернет, где на блоге НАСА висят оперативные сводки о нашей экспедиции. Батарея компьютера безнадежно села, подпитка от солнечных батарей заблокирована завесой облаков.

07 августа. Холодный, вспученный дождями Кочечум. «Все перекаты, да перекаты...». Вон впереди опять вздымаются валы, летят пена и брызги. Течение реки усиливается. Идем по основному сливу, на буксире – еще две лодки. Перед перекатом река «проваливается»: основная струя, прихватывая прибрежные, резко уходит «под горку», бьется в скалу – и круто поворачивает влево. В зажатой скалами теснине – гребни стоячих волн.

Стараюсь поймать гребни основного слива, приглушая мотор на спуске и прибавляя обороты на подъеме волны. Мельком оборачиваюсь: задние лодки встречают волны носами, прихватывая воду с гребней. Когда водный хаос остался позади, Пол, самый молодой из американцев, блестя восторгом глаз, выпалил: «"5Б" категория сложности!». А Джон меланхолично поинтересовался: «И много еще такого впереди?» Что ему ответить? Аборигены вообще не обещали особых неприятностей на Кочечуме.

12 августа. Гари по берегам. И старые, и свежие: в прошлом году сушь стояла. На горяч валим деревья с пожарными подсушинами, делаем спилы. Подсушины – это летопись пожаров. Впрочем, лиственница – пирофит, т.е. вид, «любящий пожары». Пожары гонят вниз мерзлоту, а освобожденные от мхов и лишайников почвогрунты вновь готовы для заселения лиственницей. Как, впрочем, и пришлыми видами, двигающимися на север под влиянием потепления климата. Например, кедром. Но это – южнее, ближе к Туре. А здесь кедр пока не выжить.

13 августа. По берегам на солнечных склонах – россыпи голубики. Крупная, сочная с кис-



Джон Рэнсон пытается войти в контакт с цивилизацией через «таежный Интернет»

линкой ягода. Джон напевает популярное у них: «I had a thrill on the blueberry hill...»

16 августа. Холодно, сыро, дождливо. Ставим палатки на косе среди нагромождения валунов. Американцы безропотно ворочают камни, обустриваясь. Припасы на пределе, а «крокодил не ловится».

18 августа. Темным августовским вечером добираемся до Туры. На базе ждет натопленная баня, домик с весело гудящей печкой и холодильником, наполненным всем, чем полагается. Плюс нелетная погода.

Через два дня прорвавшийся сквозь зависшую морось циклона «Антон» доставил нас в Красноярск. Успели: рано поутру у наших американских товарищей рейс на Москву. Прощайте, северные лиственничники. Прощай, Утрюм-Кочечум!

Сегодня с помощью лидарного зондирования проводятся обследования не только сибирских лесов, но и бореальных лесов Европы и Северной Америки.

Следующая ступень в развитии методов мониторинга биомассы суши – проект «DESDynI», согласно которому планируется вывести на орбиту два взаимно дополняющих исследовательских инструмента – лидара и радара InSAR. В результате пространственное разрешение лидара увеличится примерно до 25 м, а InSAR обеспечит «всепогодное» получение «картинки» в полосе обзора 340 км с наземным разрешением около 35 м.

Достоинством радарной съемки является возможность прямых измерений биомассы суши – древостоев, кустарников и напочвенного покрова. Кроме того, с ее помощью можно будет оценить гидрологический режим лесных территорий. Лидарная съемка послужит для калибровки данных InSAR, обеспечивая измерения высоты деревьев и их распределение в лесном пологе.

В итоге реализация проекта DESDynI позволит резко сократить наземные обследования лесов, что даст возможность оперативно картировать запасы древесины, а также отслеживать баланс углерода не только в бореальных лесах, но и на всей поверхности суши планеты Земля.

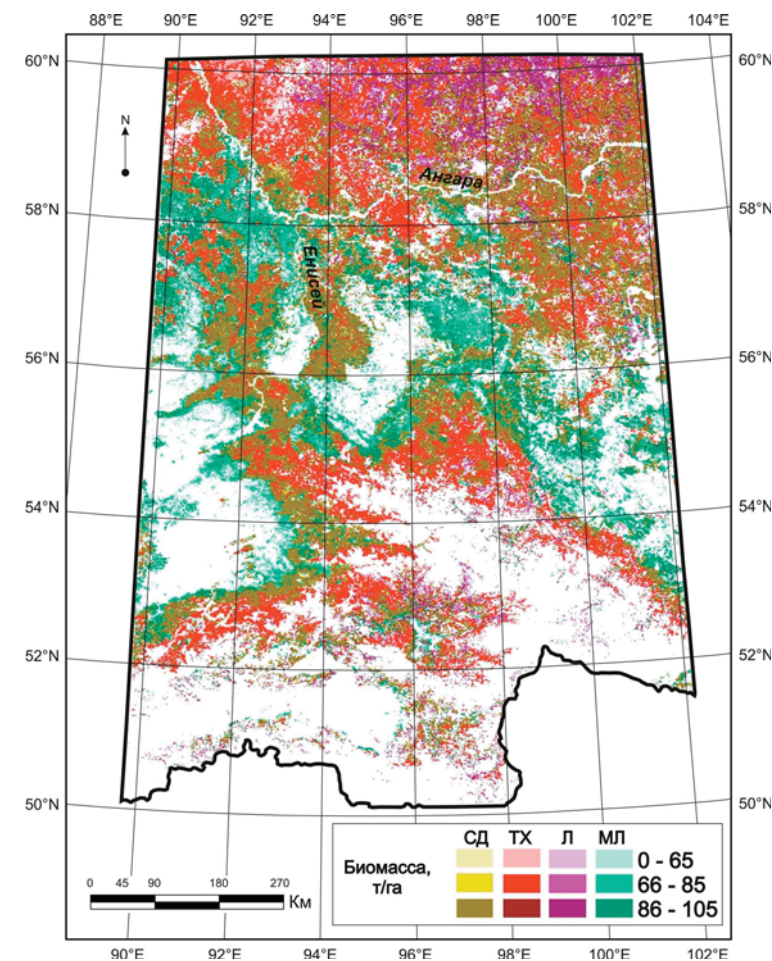
Один из главных результатов исследований «земных и небесных» – карта надземной биомассы лесов юга Енисейского меридиана, полученная при «гибридизации» данных точечных лидарных измерений (система GLAS) и карты растительности, полученной с помощью спектрорадиометра MODIS. СД – смешанные древостои, ТХ – «вечнозеленые» (сосна, кедр, ель, пихта) хвойные древостои, Л – лиственничники, МЛ – лиственные (береза, осина) древостои

Литература
Лесной фонд России. М.: ВНИИЦ лесресурс, 2004. 633 с.

Солодухин В.И., Жуков А.Я., Мажугин И.Н. Возможности лазерной аэрофотосъемки профилей леса // Лесн. хоз-во, 1977. Т. 10. С. 53–58

Харук В.И., Рэнсон К.Дж., Федотова Е.В. и др. Радиолокационное зондирование таежных лесов // Лесо-ведение. 2000. № 5. С. 29–34.

<http://icesat.gsfc.nasa.gov>
<http://www.csr.utexas.edu/glas/>
<http://desdyni.jpl.nasa.gov>



Благодаря потеплению молодая поросль лиственницы продвигается все выше по склонам саянских хребтов