

УДК 577.4

Б. З. Цыдыпов¹, И. И. Кирбижекова², Б. Ч. Доржиев², О. Н. Очиров²¹ ФГОУ ВПО «Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова», Улан-Удэ

E-mail: bz61@mail.ru

² Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН, Улан-Удэ

E-mail: 1_2_z@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БИОМАССЫ ЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ ДАННЫХ¹

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радарное изображение, биомасса леса, таксационные характеристики, номограмма, коэффициент обратного рассеяния.

Определение запасов лесных ресурсов стандартными методами является достаточно трудоемкой работой. Предлагаемый метод оценки запасов леса на основе радарных данных дистанционного зондирования дает возможность существенно сократить затраты и проводить оценку биомассы леса в масштабе времени, близкому к реальному.

B. Tsydyrov¹, I. Kirbizhekova, B. Dorzhiev, O. Ochirov¹FSEI HPT "Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov", Ulan-Ude

E-mail: bz61@mail.ru

Department of Physical Problems the Buryat Science Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences, Ulan-Ude, E-mail: 1_2_z@mail.ru

ESTIMATION OF FOREST BIOMASS USING SATELLITE RADAR DATA

Key words: remote sensing, radar image, forest biomass, forest valuation characteristics, monogram, backward scattering coefficient.

Definition of reserves of forest resources by standard methods is sufficiently labour intensive work. The offered evaluation method of forest resources on the basis of radar satellite survey gives an opportunity to reduce expenses essentially and to appraise of forest biomass in the time scale close to real.

Введение. Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов леса имеют глобальное экологическое, экономическое и социальное значение. Оценка региональной и глобальной биомассы леса важна для понимания и контроля отклика экосистемы на изменение климата и техногенные воздействия. В то же время обеспеченность информацией о состоянии и динамике лесов планеты все еще остается недостаточной и не отвечает современным требованиям устойчивого управления лесными ресурсами. Необходимость ведения мониторинга лесов на огромных территориях

побуждает рассматривать спутниковые наблюдения в качестве приоритетного источника информации о состоянии и динамике лесов, определяет актуальность развития различных методов обработки получаемых данных.

Источниками радарной спутниковой информации являются европейские системы *ERS-1,2*, японские системы *JERS-1,2*, канадская система *RADARSAT*, а также американские радары с синтезированной апертурой *SIR*, применявшиеся на корабле многоцелевого использования *Shuttle*. Данные системы продемонстрировали возможность надежного

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ «Мониторинг состояния лесных сред бассейна озера Байкал по данным спутниковых и наземных радаров» (№ 08-02-98009р-сибирь-а).

получения радарных изображений поверхности Земли круглосуточно и в любых погодных условиях. В ряде работ [1-3] приводятся оценки биомассы лесов бореального пояса, полученные зарубежными авторами. В России хорошую перспективу для радиоволнового зондирования земных покровов имеет система ГЛОНАСС, которая в процессе своего развития будет иметь достаточное количество космических аппаратов на орбите, большие мощности передатчиков, разнообразие частот и режимов посылки навигационных сигналов. Данная система может найти применение и для просвечивания лесных покровов под разными углами. В результате будет получена исходная информация для томографической обработки данных, что в конечном итоге позволит выявлять внутреннюю структуру толщи лесного покрова, определять высоту древостоя, полный и послойный разрез биомассы. При этом основу разрабатываемых методов обработки данных дистанционного зондирования составляют теоретические и экспериментально устанавливаемые взаимосвязи между измеряемыми параметрами отраженного сигнала с биофизическими и другими характеристиками лесов. В данной работе исследована возможность определения биомассы леса по спутниковым радарным данным. Классическим подходом решения такой задачи является выбор тестового участка леса, характеристики которого хорошо известны, и анализ радарных данных этого же участка. В качестве такого эталонного участка выбран заказник на территории Степноворечского лесничества Кабанского района Республики Бурятия. Данный выбор обусловлен отсутствием лесных пожаров на территории заказника за последние 15 лет и тем, что в заказнике запрещена любая хозяйственная деятельность. К тому же на данный участок леса имеются хорошо известные таксационные данные, что в совокупности позволяет говорить о нем как о тестовом участке подспутникового полигона.

Описание тестового участка. Тестовый участок расположен на восточном побережье оз. Байкал, южнее дельты р. Селенги, окружен с трех сторон полями и пашнями, что позволяет без труда определить его на радарном снимке. Географические координаты центра лесного массива $52^{\circ}06'$ с.ш. и $106^{\circ}21'$ в.д. В геоморфологическом отношении район представляет собой прибайкальскую равнину со средней высотой 477 м над уровнем моря. Климат сравнительно мягкий, уровень осадков до 1000 мм в год. На обследованном участке можно выделить следующие лесообразующие породы: сосна обыкновенная, береза, ель и осина. Для определения биомассы леса на исследуемом участке использовались таксационные данные лесничества (рис. 1). Древостой одноярусный, имеет класс бонитета 2-4 и запас древесины до 150 м^3 на га. Под пологом древостоя сильный подрост возрастом до 5-6 лет. Более взрослый и крупный подрост имеется в «окнах» древостоя. Подлесок редко достигает сомкнутости 0,3-0,4 и представлен рододендром даурским, ольховником, спиреей, козьею ивой и шиповником. Травяной покров хорошо выражен. Иногда он образует сомкнутый полог высотой до 1 м и отличается значительным видовым разнообразием (до 40 видов). Моховой покров слаборазвит. Березовые леса на тестовом участке являются производными от темнохвойных и светлохвойных лесов. В основном их появление вызвано такими естественными процессами как пожары. Характерной особенностью является относительно чистый состав древостоя. Разновозрастный древостой состоит из нескольких поколений деревьев. Средняя высота деревьев – 17 м, средний диаметр ствола – 22 см.

Описание радарных данных. В решении задачи оценки биомассы использовались данные спутникового зондирования земной поверхности, полученные со спутников *ERS1*, *ERS2* и *JERS*. Данные радиолокационного дистанционного зондирования на Байкальскую природную территорию представлены ска-

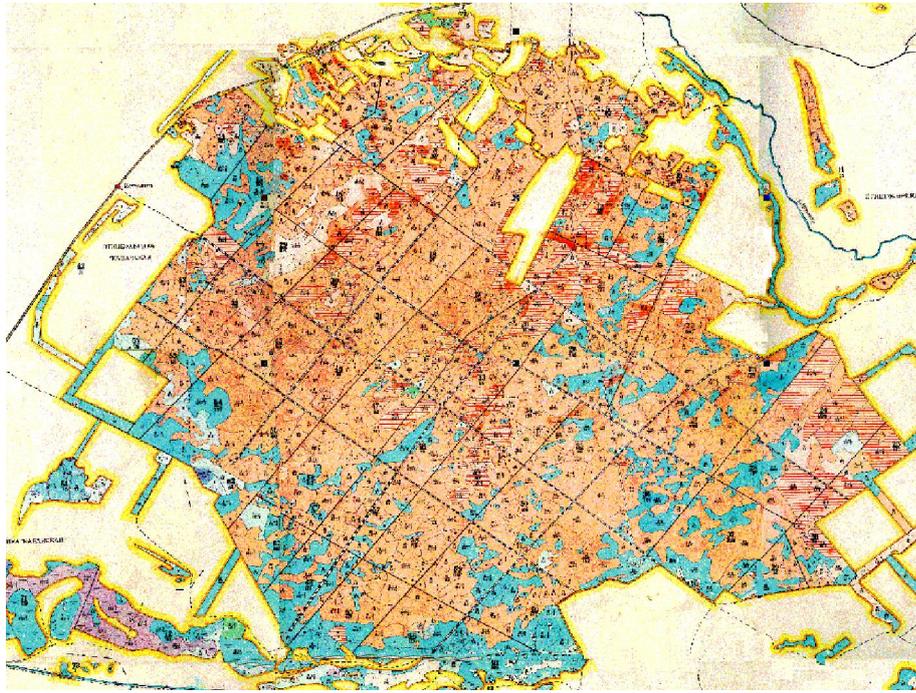


Рисунок 1 – Таксационная карта тестового участка

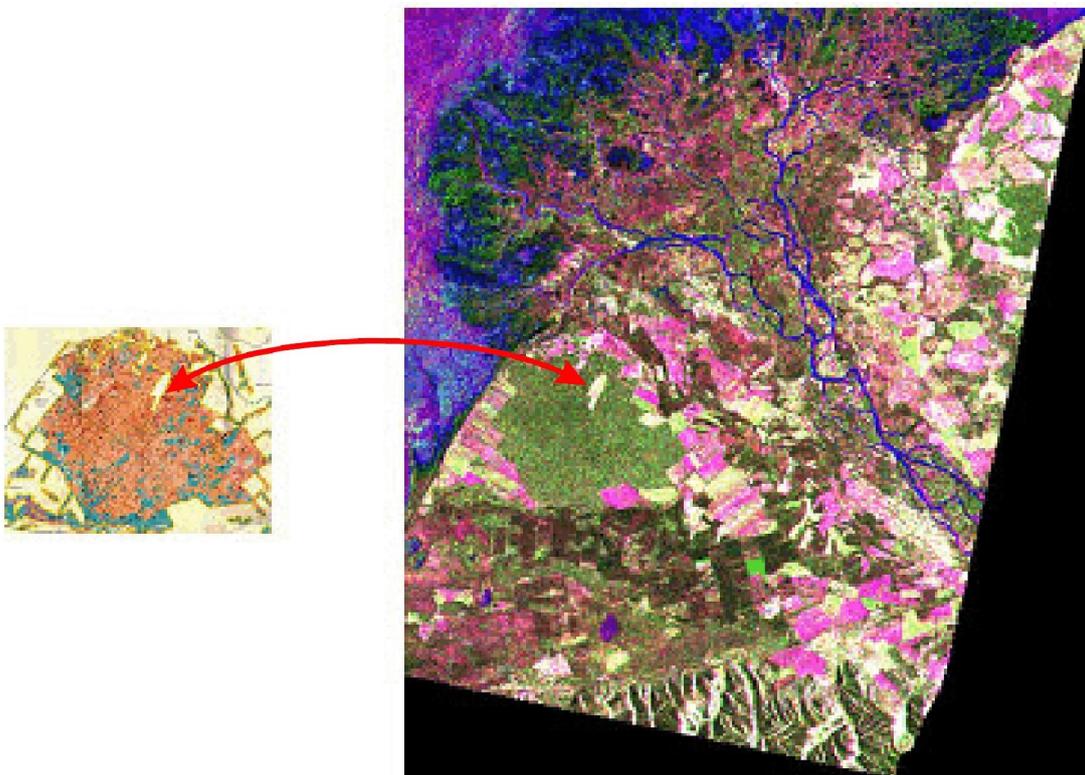


Рисунок 2 – Фрагмент радиолокационного снимка (слева – лесотаксационная карта)

нерными изображениями в микроволновом диапазоне в *C*- и *L*-полосах (соответственно 5 и 25 см), полученными радаром с синтезированной апертурой во время миссий *ERS1*, *ERS2* и *JERS* в июле 1997 г. и в апреле 1998 г. Сцены вытянуты вдоль подспутниковой трассы (угол наклона орбиты 98°) и охватывают

площадь размером примерно 1000 км^2 . Высота космической платформы варьирует между 780 и 568 км, угол сканирования изменялся от 19° до 26° . После проведения пространственного усреднения для уменьшения спекла снимка разрешение равно 30 м. Для оценки биомассы тестового лесного массива был

использован соответствующий фрагмент радарного изображения (рис. 2). Данные были получены от Немецкого космического агентства в рамках международных проектов *ERS AO-3 SIBERIA* и *INTAS 97-1040*. Для обработки и анализа дистанционных данных использовался программный комплекс *ENVI 3.1*.

Определение биомассы. Для определения запасов древостоя и, соответственно, биомассы были использованы номограммы Н.П. Анучина [4]; для их применения достаточно знания двух таксационных параметров – средней высоты и полноты насаждений. На крупномасштабных топографических картах приводятся такие средние параметры как высота, диаметр и расстояние между деревьями. Приведем пример определения запаса древостоя при следующих параметрах: высота древостоя $\bar{H} = 15 \text{ м}$, средний диаметр деревьев $\bar{D} = 16 \text{ см}$, среднее расстояние между деревьями $\bar{L} = 4 \text{ м}$. Данные взяты из топографической карты исследуемого участка. Находим площадь сечения:

$$S_{\text{сеч.}} = \frac{\pi \bar{D}^2}{4} \approx 0,02 \text{ м}^2 \quad (1)$$

Так как среднее расстояние между деревьями равно 4 м, то на одном гектаре растет $25 \times 25 = 625$ деревьев в среднем. Таким образом, сумма площадей всех деревьев на 1 га равна $12,56 \text{ м}^2$.

Согласно номограмме запас древостоя при такой сумме площадей равен $92 \text{ м}^3/\text{га}$ (рис. 3, б). Теперь, используя высоту и запас, по номограмме на рис. 3, а можно определить полноту древостоя; она равна 0,42. Полнота показывает, во сколько раз реальный древостой отличается от идеального, в котором нет ни одного лишнего или недостающего дерева. Зная среднюю высоту и полноту, находим запас по номограмме (рис. 3, а).

Для нахождения биомассы используем следующее выражение:

$$B_m = V * p + 15\% (V * p), \quad (2)$$

где V – объем запаса, p – плотность древесины (для сосны – $0,467 \text{ т/м}^3$, для березы – $0,650 \text{ т/м}^3$), 15% от вычисленного значения учитывают биомассу хвои, листвы и веток. Вычисленные таким образом биомассы сосновых и березовых лесов тестового участка представлены в таблице 1.

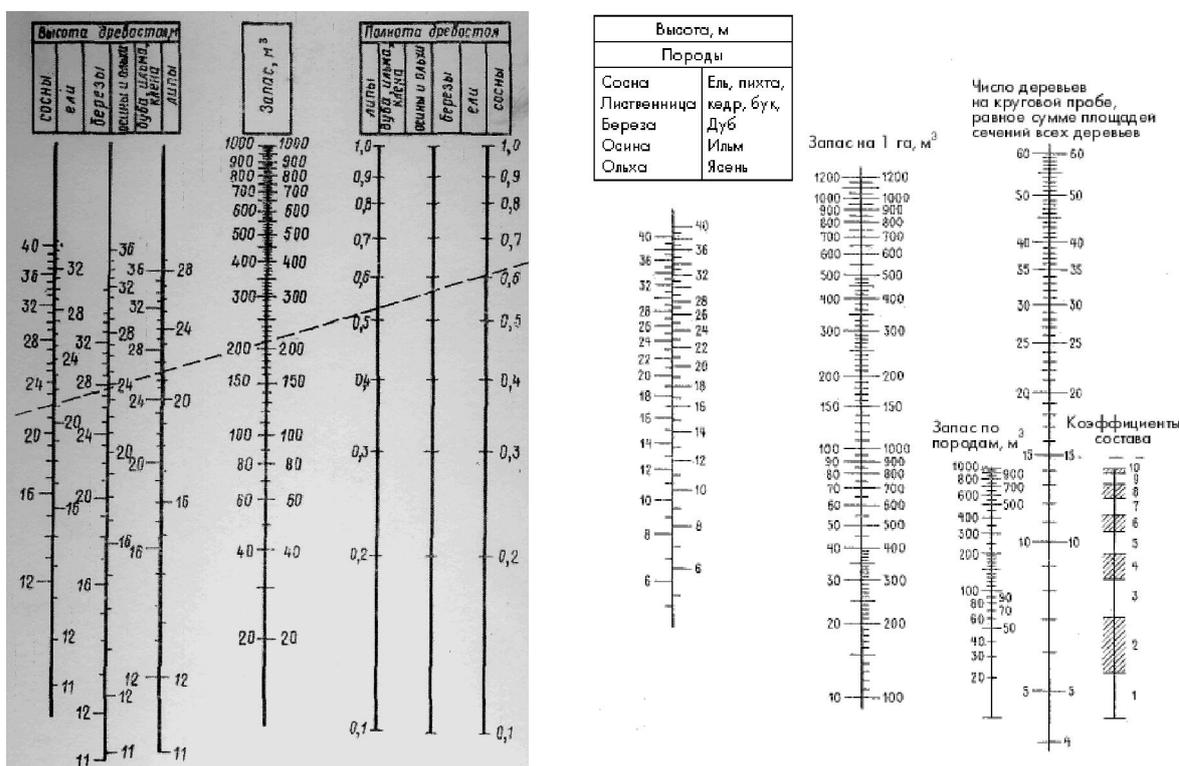


Рисунок 3 – Номограммы для определения запаса древостоя

Таблица 1 – Биомассы сосновых и березовых лесов тестового участка

Класс возраста	Класс бонитета	Возраст, лет	Средняя высота, м	Запас, м ³ /га	Биомасса, т/га
Сосна					
2	2	40	14	85	45,65
2	3	40	12	70	37,59
3	2	60	19	125	67,13
3	3	60	16	100	53,71
4	2	80	23	150	80,56
4	3	80	20	130	69,82
4	4	80	16	100	53,71
5	3	100	23	150	80,56
5	4	100	19	125	67,13
Береза					
3	3	30	9	25	19
4	2	40	14	60	45,63
4	3	40	12	45	34,22
4	4	40	9	25	19
5	3	50	14	60	45,63
6	4	60	13	52	39,55

Расчет биомассы по радиолокационным данным и результаты анализа

Используя программный комплекс *ENVI* и данные радарного зондирования, был рассчитан коэффициент обратного рассеяния (КОР) от тестового лесного массива по формуле:

$$\sigma = 10 \times \lg(I / 1000), \quad (3)$$

где I – интенсивность отраженного радиосигнала, полученная в результате зондирования. Эти данные в дальнейшем использовались для нахождения функцио-

нальной зависимости КОР от биомассы.

Анализ корреляционной связи между КОР и наземными данными о биомассе леса предусматривает процедуру нахождения однозначной регрессионной функции. Исходные данные для регрессионной функции приведены в таблице 2.

Меньшее число участков леса, приведенных в табл. 2, объясняется тем, что значения биомасс, рассчитанные для разных участков, совпадают в некоторых случаях.

Таблица 2 – Данные для регрессионной функции

Сосна	1	2	3	4	5
КОР, дБ	-8,9	-8,8	-9	-8,8	-8,5
Биомасса, т/га	37,59	46,65	53,71	69,82	80,56
Береза	1	2	3		
КОР, дБ	-8,1	-7,7			
Биомасса, т/га	19	39,22	46,53		

В целом можно отметить уменьшение абсолютных значений КОР с ростом биомассы. Физически это объясняется увеличением обратного рассеяния сигнала от более плотной лесной среды. Наглядно такая зависимость показана на графиках, где КОР представлен как функция от биомассы леса (рис. 4). Здесь

по оси x отложены значения биомассы в т/га, а по оси y – соответствующие значения КОР в дБ. Для получения функциональной зависимости между этими параметрами проанализировано несколько видов зависимости, а именно: линейная, логарифмическая и полиномиальная.

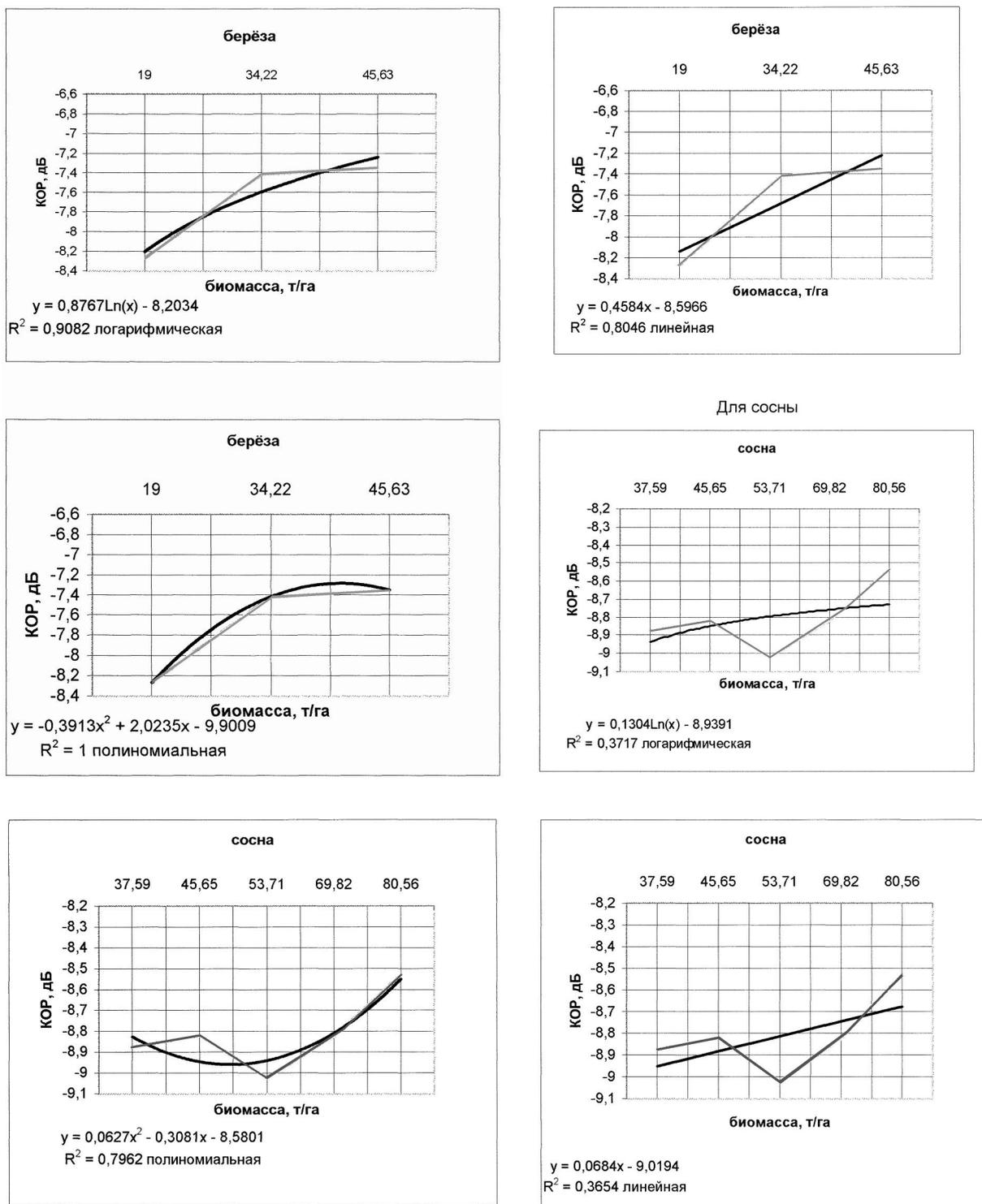


Рисунок 4 - Зависимость КОР от биомассы

На графиках приведены численные значения КОР для каждого вида зависимости и коэффициенты детерминации, характеризующие долю изменчивости диаграммы. Анализ построенных кривых показывает следующее. Несмотря на высокий коэффициент детерминации, для полиномиальной зависимости (для березового леса $R^2 = 1$!) она не имеет физического смысла и приведена здесь

для иллюстрации того, каким образом можно аппроксимировать построенную кривую для ограниченного участка. Из оставшихся двух видов регрессии несколько больший коэффициент детерминации имеет логарифмическая зависимость следующего вида:

$$y = a \ln x - b, \quad (4)$$

где a и b определяются из конкрет-

ного вида кривой, построенной по экспериментальным точкам. Разброс точек на диаграмме можно объяснить ограниченным числом выбранных тестовых участков.

Такое ограничение числа выборок вызывает необходимость построения доверительного интервала. При этом для оценки математического ожидания при малом числе выборок и неизвестном среднем квадратичном отклонении КОР следует воспользоваться t -распределением Стьюдента.

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt. \quad (5)$$

На рисунке 5 представлена зависимость КОР от биомассы соснового леса,

где также приведен построенный доверительный интервал при значении интеграла вероятностей, равном 0,95. Здесь параметр $t = 1,96$ при числе выборок $n = 5$.

Как видно из рисунка 5, приведенная логарифмическая зависимость вполне укладывается в рамки доверительного интервала, ограниченного на рисунке сверху и снизу пунктирными линиями. Таким образом, с вероятностью 95 % можно утверждать, что значения КОР с допустимым разбросом $\pm 0,2$ дБ будут определять соответствующие значения биомассы леса. Для повышения надежности оценок биомассы леса на основе спутниковых данных следует увеличить объем выборки, что потребует дополнительных исследований.

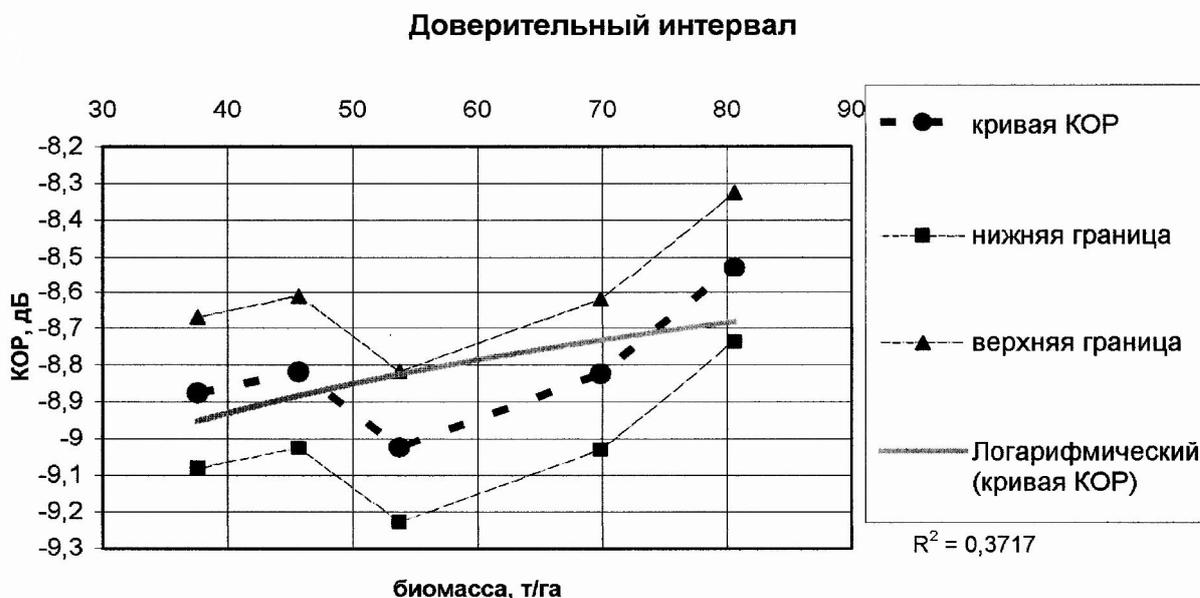


Рисунок 5 – Доверительный интервал

Заключение. Методика определения биомассы лесных сред, предложенная в данной работе, основана на совместном анализе спутниковых и наземных данных. Одним из основных результатов данной работы является установление регрессионной зависимости между КОР и биомассой лесов, характерных для Байкальской природной территории. Это позволяет ставить задачу разработки физической модели взаимодействия электромагнитного излучения с лесными покровами и совершенствовать ал-

горитмы обработки радарных данных. Однако необходимо отметить небольшой уровень корреляции данных с регрессионными зависимостями ($R^2 = 0,37$), что пока недостаточно для разработки практически значимых методик.

Для построения более точной методики определения биомассы леса необходимы дополнительные исследования, включающие учет различных факторов, увеличение объема выборки, уточнение метода определения запаса древесины по номограммам и т.д. В целом дальней-

шие исследования в данной области внесут свой вклад в решение обратных задач дистанционного зондирования.

Библиографический список

1. Rignot M. Mapping of forest types in Alaskan boreal forests using SAR imagery / M. Rignot, C.L. Williams, S.B. Way et al. / IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing. – 1994. – Vol. 32. – N 5. – P. 1051-1059.
2. Dobson M.C. Knowledge-based land-cover classification using ERS-1/

JERS-1 SAR composites / M.C. Dobson, L.E. Pierce, F.T. Ulaby // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing. – 1996. – Vol. 34. – N 1. – P. 83-99.

3. Ranson K.J. Mapping of boreal forest biomass from spaceborne aperture radar / K.J. Ranson, G. Sun, K.H. Lang et al. // J. of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102. – N D24. – P. 29599-29610.

4. Основы лесного хозяйства, таксация леса и охрана природы – М.: Агропромиздат, 1989.

УДК 504.062:379.8

Т. Б. Цырендоржиева¹, Э. Д. Санжеев²

¹ГОУ ВПО «Бурятский государственный университет», Улан-Удэ

²Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ

ГОРОД УЛАН-УДЭ КАК ОБЪЕКТ РЕКРЕАЦИОННОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Ключевые слова: рекреационный потенциал, функциональное зонирование, рекреационные зоны, ландшафтное картографирование.

В статье рассмотрен рекреационный потенциал города Улан-Удэ, проведено функциональное зонирование, выделены основные сформировавшиеся рекреационные зоны и обоснованы возможности их расширения. Предложено использование методики ландшафтного картографирования при разработке планов – проектов развития территории города.

T. Tsyrendorzhiyeva, E. Sanzheev

FSEI HPT «Buryat State University», Ulan-Ude

Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences, Ulan-Ude

CITY OF ULAN-UDE AS OBJECT OF RECREATIONAL WILDLIFE MANAGEMENT

Key words: recreational potential, functional zoning, recreational zones, landscape mapping.

In article the recreational potential of a city of Ulan-Ude is considered, functional zoning is spent, the basic generated recreational zones are allocated and possibilities of their expansion are proved. Use of a technique of landscape mapping by working out of plans – projects is offered of development of a city territory.

Введение. Стремительное развитие урбанизации особенно в крупных городах и их пригородных зонах требует усиление внимания проблемам рекреационного природопользования. Наиболее приоритетным направлением в прора-

ботке данной проблемы является вопрос об использовании урбанизированных ландшафтов в рекреационных целях.

Урбанизированные ландшафты отличаются практически полностью измененной природной средой, но следует