

Оценка надземной биомассы лесов радиолокационными методами

И. А. БАБИЙ¹, С. Т. ИМ^{1, 2, 3, 4}, В. И. ХАРУК^{2, 3}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева
660014, Красноярск, ул. Красноярский рабочий, 31

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
(обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН)
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

³Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

⁴Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова
655017, Абакан, просп. Ленина, 90

Статья поступила 10.04.2022

После доработки 18.05.2022

Принята к печати 18.05.2022

АННОТАЦИЯ

Динамика лесной биомассы бореальных лесов оказывает существенное влияние на глобальные углеродные циклы. Оценки биомассы способствуют пониманию углеродного баланса лесной растительности в Сибири. Рассмотрены методики оценок надземной биомассы лесов на основе радиолокационных данных дистанционного зондирования, используемые в современных исследованиях (2010–2021 гг.). Описываются применяемые методики оценок биомассы, включая этапы полевых исследований, предварительной обработки данных, и моделирования связей данных дистанционного зондирования (ДЗ) с биомассой. Радиолокационное зондирование обладает ограниченными возможностями для оценки биомассы лесов, связанные с характеристиками съемочной аппаратуры и параметрами древостоев. В современных исследованиях производится комбинирование оптических и радиолокационных данных ДЗ, позволяющее получить более точные оценки биомассы с помощью моделей регрессий, машинного обучения и специальных методик (BIOMASAR, SWCM, MaxEnt). Применение данных об оптической глубине растительного покрова, оцененной по данным микроволновой съемки, позволяет решить проблему насыщения при оценке больших величин биомассы. Сравнение точностей методик оценки биомассы затруднено из-за отсутствия единых подходов проведения экспериментов и вычисления погрешностей. Ошибки оценки биомассы на основе оптических и радиолокационных данных значительно варьируются и в среднем составляют ~25 %. Оценка биомассы бореальных лесов Сибири затруднена из-за малого количества опорных полевых материалов. В настоящее время для оценки биомассы бореальных лесов с высоким пространственным разрешением является перспективной разработка методики на основе алгоритмов машинного обучения применительно к данным радиолокационного дистанционного зондирования со спутников Sentinel-1 и ALOS-PALSAR.

Ключевые слова: биомасса, дистанционное зондирование, аллометрия, углерод, мониторинг, РСА.

ВВЕДЕНИЕ

Биомасса определяется как масса всего органического вещества на единицу площади в определенное время. Данный показатель играет две основные роли в экологической системе. Во-первых, биомасса в течение долгого времени хранит углерод в древостоях, усвоенный из атмосферы путем фотосинтеза. Во-вторых, является источником выбросов CO₂, других газов и аэрозолей в атмосферу при деградации биомассы. Глобальные оценки биомассы и ее динамики являются важными компонентами в климатических моделях. Значимость биомассы в качестве важнейшей переменной обуславливается ее ролью как в качестве поглотителя углерода в процессе фотосинтеза, так и для производства энергии [Sessa et al., 2008].

Лесная экосистема обычно представлена пятью углеродными пулами, среди которых выделяют надземную живую биомассу (above ground biomass, AGB), подземную живую биомассу, сухостой, нелесную растительность и подстилку, а также почву. Среди перечисленных углеродных пулов особенно значимой считается надземная биомасса, которая составляет ~80 % фитомассы [Mette et al., 2002] и является наиболее простым пулом для репрезентативных оценок. Лесная надземная биомасса включает в себя живые компоненты деревьев – стебли, ветви и листья [Omar et al., 2017]. В глобальной международной системе мониторинга и прогноза климата (Global Climate Observing System, <https://gcos.wmo.int>) надземная биомасса является одним из важнейших параметров [Santoro et al., 2021].

Согласно другой классификации биомасса лесных экосистем подразделяется на живую и мертвую [Herold et al., 2019]. Живая биомасса представлена надземной и подземной биомассами. Надземная включает надземную часть живого растительного покрова (деревья, полог, подстилка).

Динамика биомассы характеризует следующие три климатических воздействия. Во-первых, текущее состояние поверхности Земли имеет наибольший потенциал для поглощения углерода за счет его накопления в растениях и почве. Во-вторых, деградация лесной биомассы приводит к выбросам углекислого газа и других парниковых газов. В-третьих,

древесная биомасса непосредственно влияет на водные и энергетические потоки [Herold et al., 2019].

Количественное описание распределения биомассы в целом и биомассы лесов в частности имеет важное значение для инвентаризации биосеквестрированного углерода и моделирования глобальных биогеохимических циклов, а также для понимания исторических и будущих последствий деятельности человека [Bar-On et al., 2018].

Бореальные леса занимают второе место по распространенности (27 %) и являются поглотителем углерода [Global forest..., 2020]. Однако пожары, вырубки, массовые вспышки насекомых вредителей и другие факторы способствуют выбросам углерода. Перечисленное указывает на необходимость проведения мониторинга динамики надземной биомассы лесов. В настоящее время инвентаризационные данные о лесах России часто не соответствуют их реальному современному состоянию для многих регионов [Stelmaszczuk-Górska et al., 2016, 2018]. Это приводит к значительным искажениям в современных оценках лесной биомассы. Оперативное получение данных о динамике лесной биомассы возможно с помощью методов дистанционного зондирования Земли.

При анализе текущих климатических изменений важно иметь представление о балансе углерода, и в этом биомасса играет важную роль в его определении, поскольку сама биомасса является одним из значимых параметров при оценке углерода. Несмотря на существующие проблемы российской инвентаризации лесов, имеются исследования, указывающие на рост запасов древостоев, биомассы и углеродных пулов лесных экосистем [Schepaschenko et al., 2021], что уравновешивает потери запасов стволовой древесины в тропических зонах. Глобальная оценка лесных ресурсов [Global forest..., 2020] показала сокращение с 1990 г. площади лесов в мире на 178 млн га. Общие запасы углерода в лесах снизились с 668 гигатонн в 1990 г. до 662 гигатонн в 2020 г.; за этот же период плотность накопления углерода немного возросла – со 159 до 163 т/га. При этом в разных регионах мира запасы углерода изменяются неравномерно. С учетом увеличения площади лесных насаждений в Азии важным является

определение углеродного баланса Сибири для оценки вклада данных территорий в изменение климата.

Цель данной работы заключалась в анализе методик оценки лесной надземной биомассы на основе радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли, применяемых в современных исследованиях.

1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе анализировались публикации об оценках надземной биомассы лесных экосистем по радиолокационным данным дистанционного зондирования Земли и методах их реализации, а также о схожих по тематике исследованиях. Поиск анализируемых публикаций осуществлялся по ключевым словам в базах данных ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), Nature (<https://www.nature.com/>), eLIBRARY.RU (<https://www.elibrary.ru/defaultx.asp>) и путем просмотра списков ссылок предыдущих нарративных обзоров.

Для первоначального поиска использовались запросы с использованием ключевых слов: SAR, forest, biomass, remote sensing. Период анализируемых публикаций покрывает 2010–2021 гг. В ScienceDirect с отметкой “Agricultural and Biological Sciences” в разделе фильтров Subject areas найдено 175 ссылок. Также с установленным фильтром Publication title в поле “Remote Sensing of Environment” и “Forest Ecology and Management” нашлось 303 результата, в Nature – 16 ссылок, в eLIBRARY.RU – 10. В результате первой попытки поиска из 504 публикаций отобрано 114 наиболее значимых и демонстрирующих современное состояние исследований в области методик оценки надземной биомассы лесных экосистем. Стоит учитывать, что найденные публикации могли быть размещены в нескольких базах данных, следовательно, реальное количество найденных работ меньше представленного значения.

После исследования отобранного материала были найдены и изучены публикации, важные для понимания прочитанного, на которые ссылаются выделенные работы. Также на основе полученной информации выполнены дополнительные запросы к базам данных. Всего вторая выборка анализируемых материалов состояла из 57 работ. Второй этап поиска пуб-

ликаций не был ограничен временными рамками опубликования работ.

В итоге проведенного отбора выбрана 171 наиболее значимая и репрезентативная публикация, в том числе 14 обзорных работ, на основании которых сделаны выводы о современном состоянии исследований в области методик оценки надземной биомассы лесных экосистем. Возможно, некоторые публикации не были учтены в данной работе, так как находятся в закрытом доступе, являются малоизвестными или не находятся в выбранных базах данных.

Публикаций, непосредственно описывающих исследования по оценке биомассы или ее предикторов, в полученной выборке содержалось 51, краткая информация о которых изложена в таблице.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В современных исследованиях надземная биомасса оценивается на основе полевых исследований и данных дистанционного зондирования (ДЗ) Земли.

2.1. Оценка лесной биомассы по данным полевых измерений

Полевые измерения обычно используются при разработке прогностических моделей или аллометрических уравнений для оценки биомассы и проверки точности результатов, полученных по данным ДЗ [Vashum, 2012]. Для определения биомассы в полевых условиях применяются два метода – прямые измерения и косвенная оценка.

Метод прямых измерений биомассы (“harvest method”) подразумевает сбор всех деревьев на исследуемом участке. Измеряются сырая и сухая биомассы составных частей собранных деревьев (ствол, листья, ветви). Данный способ позволяет получить наиболее точные оценки надземной биомассы лесных экосистем и накопленного углерода. Метод применим только для небольших территорий и является разрушительным, трудоемким и дорогостоящим [Vashum et al., 2012].

Метод косвенной оценки биомассы заключается в измерении параметров деревьев на основе аллометрических моделей. Последние позволяют оценить биомассу на основе

Сводная информация о методиках расчета лесной биомассы на основе данных дистанционного зондирования

№	Методика	Авторы работ	Год исследования	Использованные данные	Период данных	Объект анализируемой биомассы	Тип биомассы	Измеряемые величины биомассы	Точность определения биомассы (RMSE, лучший показатель)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Регрессионный анализ	Wang et al.	2021	GaoFen-3 (GF-3), WorldView-3	2017	Смешанные листовные и хвойные	AGB	Н. д.	19 %
2		Sarker, Nichol	2011	ALOS AVNIR-2	2007	Субтропические вечнозеленые широколиственные	AGB	Н. д.	32 Мг/га
3		Næsseta et al.	2013	Лидар Ortech ALTM 1210 воздушного базирования	1999, 2010	Хвойные	AGB	Н. д.	Н. д.
4		Kuplich et al.	2005	JERS-1	1994, 1995	Тропические	AGB	Н. д.	Н. д.
5		Mialon et al.	2020	SMOS L-VOD	2010–2017	Глобальная оценка	AGB	Н. д.	Н. д.
6		Saatchi et al.	2011	SAR NASA/JPL AIRSAR в Р- и L-диапазонах с HH, HV и C-диапазоне с VV и интерферометрическом режиме	2004	Тропические	AGB	100–200 Мг/га для L, 300 Мг/га для Р	10–15 %
7		Momen et al.	2017	AMSR-E (VOD), AMSR-2, IceSat/GLAS, MODIS	2004–2014	Смешанные листовные и осново-можжевеловые	AGB	Н. д.	Н. д.
8		Dong et al.	2003	AVHRR NOAA-7, -9, -11, -14	1981–1999	Канада, Финляндия, Норвегия, Россия, США и Швеция	AGB	Н. д.	Н. д.
9		Mitchard et al.	2009	ALOS PALSAR	2007	Тропические	AGB	400 Мг/га	20–30 %
10		Brandt et al.	2018	GEOV2, MODIS, SMOS L-VOD, X-VOD из различных спутниковых систем	1999–2017	Смешанный субтропический вечнозеленый и широколиственный лес	AGB	Н. д.	±25 %
11		Norovsuren et al.	2019	Sentinel-1B, Sentinel-2B	2016	Лиственные	AGB	Н. д.	Н. д.
12		Сочилова и др.	2018	Landsat-8/OLI	2014, 2016	Смешанные хвойные и листовные	GSV	Н. д.	2,7–50,4 %
13		Rodríguez-Fernández et al.	2018	SMOS L-VOD	2011–2012	Континентальная оценка Африки	AGB	Н. д.	Н. д.

14	Xiangxing et al.	2021	SAR Quad-roi, воздушного базирования Р-диапазона	2009	Тропические	AGB	Н. д.	42,45 Мг/га
15	Laurin et al.	2018	Sentinel-1, ALOS PALSAR2, Sentinel-2	2015–2016	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	Н. д.	Со стандартным отклонением 113,9 Мг/га
16	Omar et al.	2017	PALSAR-2, Sentinel-1A	2016	Тропические	AGB	200 Мг/га	14 Мг/га
17	Wagner et al.	2003	ERS-1, ERS-2, JERS	1995–1998	Хвойные и лиственные	GSV	80 м ³ /га	Н. д.
18	Brandt et al.	2018	SMOS L-VOD	2010–2016	Тропические	Надземные запасы углерода	Не зафиксировано	11 Мг/га
19	Schlund et al.	2021	TanDEM-X, Air-borne LiDAR Riegl Q780	2012, 2019, 2020	Тропические	AGB	Н. д.	2,4 Мг/га, или 13,3 %
20	Lovynska et al.	2020	Sentinel-2	2015–2019	Хвойные	AGB	Н. д.	Н. д.
21	Nguyen et al.	2020	ALOS/PALSAR-2	2014, 2015	Тропические	AGB	250–300 Мг/га	40,3 Мг/га
22	Huang et al.	2015	SIR-C/XSAR, AIRSAR, UAVSAR, ALOS/PALSAR	1994, 2007–2010	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	200 Мг/га	Н. д.
23	Li et al.	2015	Airborne E-SAR system	2007	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	Н. д.	30,4 Мг/га
24	Liu et al.	2015	VOD из серии пассивных микроволновых спутниковых датчиков, IGBP MODIS	1993–2012	Глобальная оценка	AGB	Н. д.	Н. д.
25	RF	2018	ALOS/PALSAR-2, RADARSAT-2	2014	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	Н. д.	30,2 Мг/га
26	Argamosa et al.	2018	Sentinel-1	2015	Мангровые	AGB	Н. д.	0,44 Мг/га
27	Xu et al.	2021	IceSat/GLAS, MODIS, Landsat, лидар воздушного базирования ALS, ALOS/PALSAR	2000–2019	Глобальная оценка	Запасы углерода (C) в живой биомассе	Н. д.	± 2 PgC
28	Wang et al.	2021	Ziyuan-3 (ZY-3), Sentinel-2	2012	Хвойные	AGB	150 Мг/га	29,8 Мг/га, или 23,4 %
29	ANN	2004	AIRSAR (NASA/JPL) в Р- и L-диапазоне	1989, 1991, 1993	Разные типы для каждого участка	AGB	Н. д.	Н. д.
30	Cutler et al.	2012	Landsat/TM, JERS-1	1992, 1993, 1995–1997	Хвойные, тропические	AGB	Н. д.	Н. д.
31	Santi et al.	2021	ALOS/PALSAR, Envisat ASAR, ICESat/GLAS	2007–2009	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	Н. д.	75 м ³ /га

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
32	kNN	Persson et al.	2021	TanDEM-X, Sentinel-2, airborne photogrammetric data	2015–2016	Хвойные	AGB	Н. д.	31,4 Мг/га, или 29,1 %
33	SWCM	Joshi et al.	2015	ALOS/PALSAR, COWI	2006, 2007	Широколиственные и хвойные	AGB	125 Мг/га и более	Н. д.
34	BIOMASAR	Santoro et al.	2021	Envisat/ASAR, ALOS PALSAR, ICESat/GLAS, Landsat-7/ETM+	2007–2011	Глобальная оценка	AGB	250 Мг/га	Стандартное отклонение AGB 50 %
35		Santoro et al.	2013	Envisat/ASAR	2004–2006	Смешанные хвойные и лиственные	GSV	Н. д.	20–30 %
36		Santoro et al.	2015	Envisat/ASAR	2010	Глобальная оценка	GSV	300 м ³ /га	29 %
37	Регрессионный анализ и оценка максимального правдоподобия (MLE), метод дерева решений (DTM)	Saatchi et al.	2007	QSCAT, JERS-1, MODIS	2000–2004	Тропические	AGB	Н. д.	14,5 Мг/га
38	Регрессионный анализ линейными моделями, RF или экстремальное повышение градиента (XGBoost)	Li et al.	2020	Landsat-8/OLI, Sentinel-1A	2015	Смешанные	AGB	Н. д.	Н. д.
39	RF, co-kriging	Su et al.	2020	Landsat, ALOS-PALSAR	1992, 2002 и 2010	Вечнозеленые и быстрорастущие, лиственные деревья	AGB	Н. д.	15,62 Мг/га, или 51,60 %
40	SVR, RF, MLR	Morin et al.	2019	Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS/PALSAR-2, SPOT	2016	Хвойные	AGB	100 т/га	19,5 Мг/га, или 28 %
41	Регрессионный анализ линейными моделями совместно с kNN	Strunk et al.	2014	Данные бортового лидара с дискретным возвратом	1984–2009	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	Н. д.	Н. д.

42	500 деревьев регрессии	Houghton et al.	2007	MODIS и его продукты Landsat-7/ETM+	2000	Северная тайга (1), средняя тайга (2), южная тайга и смешанные леса (3), умеренный лес (4) и лесостепи (5)	AGB	Н. д.	±40 %
43	SWCM, регрессионный анализ	Huang et al.	2018	Sentinel-1, ALOS/PALSAR-2	2017	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	С-диапазон Sentinel-1 50 Мг/га, PALSAR-2, 150 Мг/га	70,5 Мг/га
44	MaxEnt, RF	Stelmaszczyk-Górska et al.	2016	ALOS/PALSAR	2006–2011	Хвойные	AGB	Н. д.	MaxEnt 28,7 Мг/га или, 38,8 %, RF 35,0 Мг/га, или 36,9 %
45	Ступенчатая регрессия (SWR) и географически взвешенная регрессия (GWR); ANN, SVR, RF	Chen et al.	2019	Sentinel-1, -2	2017	Лиственные	AGB	Н. д.	61,1 Мг/га
46	MaxEnt	Saatchi et al.	2008	ICESat/GLAS, MODIS, QSCAT	1995–2005	Леса Латинской Америки, Африки и Юго-Восточной Азии	В жидкой биомассе (надземной и подземной)	Н. д.	1 %
47	MLR, k-NN, RF, SVR	Ronoud et al.	2021	Landsat-8/OLI, Sentinel-1, -2	2014–2016	Широколиственные	AGB	200 Мг/га	14,7 %
48	Multiple regression, SVM, RF, ANN	Han et al.	2022	Gaofen-1, Sentinel-1	2019	Смешанные хвойные и лиственные	AGB	Н. д.	16,26 Мг/га

Пр и м е ч а н и е. MLR – Multiple Linear Regression (множественная регрессия); SMR – Stepwise Multiple Regression (пошаговая множественная регрессия); RF – Random Forest (случайный лес); SVM – Support Vector Machine (машина опорных векторов); SVR – Support Vector Regression (регрессия методом опорных векторов); MaxEnt – метод максимальной энтропии; ANN – Artificial Neural Network (искусственная нейронная сеть); SWCM – Simple Water Cloud Model (простая модель водяного облака); kNN – k-Nearest Neighbors (к ближайших соседей). AGB – надземная биомасса (Above ground biomass); GSV – запас стволовой древесины (growing stock volume).

физических параметров деревьев, таких как диаметр на высоте груди, высота ствола дерева, диаметр кроны, порода дерева и т. д. Оценка биомассы для отдельных видов и смешанных лесов может производиться на локальном, региональном и глобальном уровне [Vashum et al., 2012]. Аллометрические модели применяются для оценки лесной биомассы и запасов углерода на основе данных инвентаризации лесов.

Существует множество аллометрических моделей для основных древесных видов, которые в основном рассчитываются по двум параметрам – высоте дерева и диаметру ствола на высоте груди, измеряемых при наземной таксации, и часто выступают в качестве основных предикторов для оценки объема стволов деревьев и фитомассы [Усольцев и др., 2020]. Применение названных параметров обусловлено простотой их измерения, а также их способностью отражать условия среды, изменяясь с возрастом сообразно складывающейся биоценотической обстановке таким образом, чтобы оптимизировать протекание физиологических процессов и поддерживать свою жизнеспособность [Демаков и др., 2015]. Традиционная трансконтинентальная аллометрическая модель выглядит следующим образом [Usoltsev et al., 2016]:

$$\ln(P) = a_0 + a_1 \cdot \ln(H) + a_2 \cdot \ln(DBH),$$

где P – фитомасса дерева в абсолютно сухом состоянии, кг; H – высота дерева, м; DBH – диаметр ствола на высоте груди, см; a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты, подбираемые в зависимости от породы дерева и его географического положения.

В работе Ю. П. Демакова и соавт. [Демаков и др., 2015] рассчитана двухпараметрическая аллометрическая функция, имеющая наилучшую аппроксимацию исходных данных по объему и сухой массе ствола, а также общей и наземной фитомассы дерева, его коры и ветвей и объясняющая более 99 % общей дисперсии:

$$Y = a \cdot h^b \cdot (d + 1)^2,$$

где Y – оцениваемая величина (объем или масса), кг; a – скорость (импульс движения) изменения; b – ускорение изменения; h – высота дерева, м; d – диаметр ствола на высоте 1,3 м, см; a , b – подбираемые параметры в за-

висимости от породы деревьев (сосна, ель, пихта, лиственница, береза, осина, липа, дуб, ольха).

Метод косвенной оценки биомассы не приводит к гибели деревьев и требует меньших затрат, чем метод прямого измерения, однако может дать большие погрешности. Аллометрические модели применяются для экстраполяции оценок биомассы на обширные территории на основе данных инвентаризации лесов и данных ДЗ Земли [Kumar et al., 2015].

2.2. Оценка наземной биомассы по данным дистанционного зондирования

Технологии ДЗ позволяют получать оперативные данные о лесном покрове на обширные территории в отличие от таксационных методов, которые применяются локально. Для измерения биомассы применяются пассивные (спектрометры или радиометры) и активные (лидары и радары) приборы.

Обычно на основе полевых измерений или лазерного зондирования лесного полога получают достаточно точные точечные оценки наземной биомассы. Далее подбирают подходящую модель связи величин наземной биомассы с данными ДЗ. После верификаций полученные модели применяются к данным ДЗ для оценки лесной биомассы для обширных территорий [Vashum et al., 2012].

На основе данных ДЗ биомасса лесов оценивается по параметрам древостоев. Например, высота деревьев, тесно связанная с биомассой, может быть оценена по данным лидарной съемки или по интерферометрическим радиолокационным данным с помощью инверсии, или используя стереоскопическую съемку. В отличие от наземных измерений, лидарные и интерферометрические методы позволяют оценить совокупную высоту полога или усредненные показатели высоты и объема древостоев на обширных территориях [Ghasemi et al., 2011].

Разрабатываются аллометрические модели, применимые к лидарным данным, учитывающие в качестве регрессоров диаметр кроны и высоту дерева [Usoltsev et al., 2016]. Возможно использование агрегированной аллометрии, например, можно оценить биомассу на основе лидарных и интерферометрических радиолокационных данных [Kumar et al., 2015].

Зачастую в случае совместного использования лидаров и радаров с синтезированной апертурой (РСА) параметры леса извлекаются из информации об амплитуде обратного рассеяния с РСА, интерферометрии РСА, интерферометрической когерентности и поляриметрической интерферометрии РСА (PolInSAR) в L- и P-диапазонах. В большинстве исследований лидарные данные сначала калибруются с полевыми измерениями, после чего исследуется корреляция между сигналами РСА и AGB, полученной из лидаров. Наиболее часто используемым методом оценки AGB при помощи лидара и РСА является зонально-ориентированный подход, использование которого позволяет извлечь предикторы, применяемые в качестве независимых переменных в моделях, разработанных на основе расположенных на той же территории районов полевых измерений [Kaasalainen et al., 2015].

Для получения адекватных моделей оценок параметров древостоев разность во времени между сопоставляемыми данными лесоинвентаризации и ДЗ должна быть минимальной. Также возможно применение данных лесоинвентаризации, актуализированных на основе полуэмпирических моделей фитомассы [Shvidenko et al., 2007; Stelmaszczuk-Górska et al., 2016, 2018].

Предпочтительным является использование полевых измерений с достаточно большим пространственным охватом для учета структурной неоднородности лесов. Необходимо учитывать размеры участков инвентаризации и сопоставляемые параметры дистанционных измерений для получения адекватных моделей оценки биомассы [Barbosa et al., 2014; Соколова и др., 2018]. В работе [Herold et al., 2019] отмечается, что обобщенные статистические данные и небольшие участки (0,1 га) с низкой точностью геопривязки не пригодны для интеграции с космическими данными. Для получения адекватных оценок биомассы необходимо применение достаточно больших участков полевых измерений.

Радиолокационные методы более чувствительны к величинам лесной биомассы, чем оптические системы. Комбинирование РСА и оптических данных может повысить качество результатов. Оптические данные позволяют актуализировать карты лесов.

Таким образом, ДЗ позволяет получить косвенные оценки биомассы [Herold et al., 2019]. По сравнению с наземными методами инвентаризации методы дистанционного зондирования более пригодны для картирования и мониторинга биомассы на обширных территориях.

2.2.1. Оценка биомассы по радиолокационным данным

Существует несколько используемых методов оценки биомассы на основе РСА. Например, оценка биомассы с помощью интерферометрии предполагает наличие пары снимков РСА, снятых с близких параллельных орбит. Такая съемка получается в результате одно- или двухпроходной интерферометрии. В первом случае одна антенна (работающая на передачу и прием сигнала) находится на борту, а вторая (только для приема) помещена на конце длинной мачты. В двухпроходной схеме съемки, или съемке с повторяющихся орбит, второе изображение снимается через некоторое время после первого с того же самого спутника или, в тандемных миссиях, с другого спутника. Биомасса оценивается на основе когерентности и фазы интерферометрических данных. Интерферометрическая когерентность – это корреляция между двумя комплексными изображениями РСА [Ghasemi et al., 2011]. Поляриметрическая интерферометрия расширяет возможности обычной (скалярной) интерферометрии.

Наиболее часто встречаемым и простым способом измерения биомассы является использование обратного рассеяния РСА. Суть данного метода заключается в поиске связей между значениями обратного рассеяния РСА и полевыми измерениями биомассы [Ghasemi et al., 2011]. В этом случае необходимо учитывать, что чувствительность радара к надземной биомассе зависит от длины волны, геометрии радиолокационных измерений, структуры растительности и условий окружающей среды, таких как влажность почвы, фенология и влажность растительности.

Современные спутниковые РСА работают с X-, C- и L-диапазонами с разными типами поляризации. Проникновение электромагнитных волн X- и C-диапазонов сдерживается верхним пологом леса, что ограничивает

возможности по измерению лесной биомассы [Huang et al., 2018; Laurin et al., 2018]. Исследования показали, что применение данных L- и P-диапазонов является предпочтительным. Электромагнитные волны этих диапазонов глубже проникают в древесный полог и отражаются преимущественно от стволов и ветвей деревьев, свойства которых менее изменчивы во времени, чем свойства листьев. Также радиолокаторы L- и P-диапазонов позволяют получать данные с высокой когерентностью [Ghasemi et al., 2011; Laurin et al., 2018]. Применение P-диапазона повышает точность оценки AGB. Однако в настоящее время орбитальные PCA P-диапазона находятся только на стадии разработки [Stelmaszczuk-Górska et al., 2016]. Комбинирование данных с разными длинами волн расширяет возможности по оценке биомассы [Omar et al., 2017; Huang et al., 2018; Laurin et al., 2018]. Чувствительность обратного рассеяния к биомассе зависит от типа поляризации радиолокационной волны, например, сигнал в VV-поляризации сильнее отражается от вертикально расположенных стволов деревьев. В современных исследованиях часто используются общедоступные данные C-диапазона со спутников серии Sentinel-1 и данные L-диапазона с радиолокатора ALOS/PALASR-2.

Радиолокационные данные, полученные в летнее и осеннее время, более пригодны для оценки AGB и запаса стволовой древесины (growing stock volume – GSV), в отличие от полученных зимой [Stelmaszczuk-Górska et al., 2016].

При оценках биомассы данные PCA имеют проблему насыщения значений наземной биомассы, когда после определенного порога значения AGB, рассчитанные с PCA, занижаются по сравнению с полевыми данными. Чем выше длина волны датчика, тем на более высоких значениях находится порог насыщения. Проблема насыщения приводит к значительным ограничениям в оценке биомассы на территориях с высокой сомкнутостью древостоев [Kaasalainen et al., 2015; Omar et al., 2017].

Перед использованием данных PCA необходимо провести их предварительную обработку, которая зачастую включает калибровку, радиометрическую и геометрическую коррекцию, фильтрацию спекл-шума, передискретизацию, составление, при необходи-

мости, временных рядов и топографическую нормализацию [Pandey et al., 2010; Omar et al., 2017; Chen et al., 2019; Li et al., 2020; Su et al., 2020]. Для корректного выполнения сопоставления обратного рассеяния и наземной оценки биомассы необходимо обеспечить надлежащую точность пространственной привязки.

Для выявления связи между обратным рассеянием и наземными измерениями биомассы применяются статистические методы, например, множественная линейная регрессия, географически взвешенная регрессия, непараметрические модели, методы машинного обучения, нейронные сети, машина опорных векторов. Так, в [Pandey et al., 2010] использовались данные Envisat ASAR C-диапазона для оценки биомассы лесов в Индии. Для установления связи между биомассой и обратным рассеиванием применялась линейная регрессия. Показано, что HV-поляризация позволяет получить более точные оценки биомассы, чем HH-поляризация.

Во многих исследованиях биомассу оценивали с помощью непараметрической модели машинного обучения “случайный лес” (Random Forest) [Breiman, 2001]. В основе метода лежит построение ансамбля деревьев решений, число которых является первым параметром модели. Каждое из этих деревьев строится на основе подвыборки, взятой из исходной обучающей выборки с помощью бутстрепа. В Random Forest при построении деревьев на стадиях расщепления вершин используется фиксированное число случайно отбираемых признаков из обучающей выборки, которое является вторым параметром модели. Каждое дерево строится без усечения – каждый лист дерева в результате содержит наблюдения только одного класса. Классификация осуществляется с помощью голосования классификаторов, которые определяются отдельными деревьями. Оценка регрессии осуществляется с помощью усреднения оценок регрессии всех деревьев. Random Forest позволяет получить более точные результаты по сравнению с другими методами оценки регрессий [Stelmaszczuk-Górska et al., 2016; Chen et al., 2019; Li et al., 2020; Su et al., 2020]. H. Su et al. [2020] сравнили непараметрические модели на основе Random Forest и комбинации Random Forest с кригингом

для оценки биомассы лесов Китая и показали, что предлагаемая методика совмещения Random Forest и кригинга позволяет произвести достаточно точное картирование наземной биомассы субтропических лесов на территориях со сложной топографией. Y. Li et al. [2020] сравнили модели оценки биомассы лесов Китая на основе линейной регрессии Random Forest и XGBoost (градиентного бустинга; <https://xgboost.readthedocs.io>) [Chen et al., 2016] по данным Sentinel-1A и Landsat-8. Отмечается, что настройка параметров модели играет важную роль в их эффективности. Наилучшие результаты показала модель XGBoost, на втором месте модель случайного леса и в конце – линейная регрессия.

Картирование биомассы возможно произвести с помощью модели MaxEnt (максимальной энтропии) [Phillips et al., 2006]. Суть модели заключается в прогнозировании распределения вероятностей случайного события, при этом прогноз должен удовлетворять всем известным ограничениям без каких-либо субъективных предположений. В этом случае распределение вероятностей является наиболее равномерным, а прогнозируемый риск наименьшим, поэтому энтропия результирующего распределения вероятностей является наибольшей. M. A. Stelmaszczuk-Górska et al. сравнили точности методов Random Forest и MaxEnt для оценки биомассы бореальных лесов по данным ALOS-PALSAR (2006–2011 гг.) и инвентаризации (1998 г.) [Stelmaszczuk-Górska et al., 2016]. MaxEnt предоставил завышенные значения AGB, в то время как Random Forests, как правило, недооценивал значения AGB. В целом, погрешности оценки AGB были одинаковыми для обеих протестированных моделей. В другой работе Random Forest применялся к многочастотным, многополярным временным сериям данных L-диапазона (ALOS-PALSAR-2) и C-диапазона (RADARSAT-2) совместно с полевыми измерениями для повышения точности оценки наземной биомассы бореальных лесов центральной части Сибири [Stelmaszczuk-Górska et al., 2018]. Наибольшая точность оценки биомассы получена при использовании L-диапазона. Включение данных C-диапазона незначительно улучшило оценку.

X. Huang et al. произвели оценку биомассы лесов Новой Англии (США), применив модель

водяного облака (Simple Water Cloud Model – SWCM [Cartus et al., 2012]) и множественные линейные регрессии к данным PALSAR-2 и Sentinel-1 с VH- и VV-поляризациями [Huang et al., 2018]. В SWCM растительный полог представляется в виде водяного облака, в котором капли воды являются одинаковыми и случайно распределенными в пространстве [Attema, 1978]. Показано, что комбинирование поляриметрических данных незначительно улучшает оценку AGB. Применение временной серии данных Sentinel-1 позволяют повысить точность оценки наземной биомассы по сравнению с использованием одной сцены. Основной проблемой установления связи между интенсивностью обратного рассеяния и биомассой является насыщение сигнала. То есть объемы AGB, превышающие уровень насыщения, не дифференцируются по величине обратного рассеяния [Kaasalainen et al., 2015]. Применение текстурных признаков позволяет повысить точность оценки биомассы [Chen et al., 2016].

Ученые Европейского космического агентства разрабатывают алгоритмы BIOMASAR для глобального картографирования биомассы. Алгоритмы применялись для оценки объема стволовой древесины (GSV) на основе временных серий данных с PCA Envisat/ASAR [Santoro et al., 2010, 2015]. Оценки производились для четырех зон Северного полушария – полярной, бореальной, умеренной и субтропической. Наименьшие погрешности наблюдались для лесов в бореальной и умеренной зонах. В дальнейшем в рамках проекта CCI BIOMASS [<https://climate.esa.int/en/projects/biomass>] на основе данных Envisat ASAR, ALOS-1/PALSAR-1, ALOS-2/PALSAR-2, Sentinel-1 созданы глобальные карты биомассы по состоянию на 2010, 2017 и 2018 гг. с пространственным разрешением ~100 м [Santoro et al., 2018, 2021].

В целом, алгоритмы машинного обучения чаще используются для оценки биомассы по сравнению с линейными регрессиями и нейронными сетями. Проблема порога насыщения радиолокационных данных для оценки биомассы приводит к ограниченности применения линейных регрессий. Нейронные сети формируют скрытые связи между входными и выходными данными, которые сложны для интерпретации человеком, и требуют

применения значительных объемов обучающих выборок. Машинное обучение тоже обладает некоторыми недостатками, но показывает относительно высокую точность результатов.

2.2.2. Оценка биомассы по спектрорадиометрическим данным

Оптические данные позволяют оценить состояние растительного покрова, включая оценку биомассы, индекс листовой поверхности, долю фотосинтетически активной радиации, валовую и чистую первичную продуктивность. Известно, что данные среднего инфракрасного диапазона (3–5 мкм) тесно связаны с биомассой и являются более информативными для характеристик растительности по сравнению с отражением в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [Kumar et al., 2015].

Встречаются работы по оценке фитомассы (живой биомассы) при помощи данных миссии Landsat совместно с материалами таксационной базы данных. Например, Е. Н. Соколова с соавт. создали карты средних возрастов, высот, запасов древостоев и фитомассы лесных насаждений [Соколова и др., 2018]. Для этого были построены регрессионные экспоненциальные зависимости лесотаксационных характеристик от значений яркости со снимков Landsat. Для каждой группы возраста насаждений выполнен расчет запасов древесины в фитомассу по конверсионным коэффициентам.

В работе [Sarker, Nichol, 2011] исследовалась применимость оптических данных ALOS AVNIR-2 для оценки биомассы. Анализировались модели простых и множественных ступенчатых линейных регрессий с использованием данных спектральной отражательной способности, спектральных соотношений, вегетационных индексов, текстурных признаков и соотношений параметров текстур. Показано, что использование текстурных признаков может значительно улучшить точность оценки биомассы.

Таким образом, оптические данные дистанционного зондирования, такие как Landsat, ALOS AVNIR-2, MODIS, AVHRR, Sentinel-2, применимы для оценки биомассы. Однако качество этих данных зависит от погодных условий съемки и зачастую дают боль-

шие погрешности в оценке биомассы, поэтому чаще всего они используются совместно с данными с других съемочных систем.

2.2.3. Синергизм радиолокационных и оптических данных для оценки биомассы

Примером совместного использования лидарных данных IceSat GLAS, PCA ALOS-PALSAR и данных оптического диапазона (MODIS LST, NBAR, QSCAT HA) является работа [Xu et al., 2021], в которой исследованы пространственно-временные изменения запасов углерода живой древесной биомассы с 2000 по 2019 г. при помощи модели Random Forest. За указанный период наблюдений запасы углерода в бореальных экосистемах (суммарные $\sim 41,3 \pm 0,6$ Пг) возросли на $+0,04 \pm 0,02$ Пг/год.

Для бореальных лесов Монголии разработана модель оценки надземной биомассы с использованием многомерного линейного регрессионного анализа по данным Sentinel-1B и вегетационному индексу NDVI, рассчитанному по данным съемки Sentinel-2B [Norovsuren et al., 2019]. Интеграция этих данных показала хорошую согласованность между ними ($R^2 = 0,66$), что способствует выполнению оценок AGB на малых площадях.

В работе [Cutler et al., 2012] анализировались мультиспектральные данные Landsat TM и PCA JERS-1 для оценки биомассы тропических лесов в Бразилии, Малайзии и Таиланде. Снимки PCA калибровались, топографически и радиометрически корректировались и взаимно привязывались. Определялись текстурные признаки, рассчитанные по данным PCA JERS-1 методами вейвлет-анализа, и матрицы смежности (GLCM – Gray-Level Co-Occurrence Matrix). Оптические данные в сочетании с текстурными признаками являлись входными данными для обучения искусственных нейронных сетей. Модель верифицировалась на основе 144 полевых измерений биомассы. Отмечается, что рассогласование прогностических моделей для различных участков вызвано погрешностями в наземных измерениях, методах оценки биомассы и процедурах обработки изображений. Недостатком использования нейронных сетей является невозможность оценки характера и формы вза-

имосвязей между входными и выходными переменными. Показано наличие тесных связей между текстурами РСА и биомассой лесов.

В исследовании [Chen et al., 2019] анализировались вклады различных переменных в оценки биомассы по данным Sentinel-1 и -2. Использовались алгоритмы вычисления AGB на основе линейной регрессии машинного обучения, искусственных нейронных сетей, метода опорных векторов регрессии, и модели Random Forest. Модель Random Forest показала наибольшую точность по результатам сопоставления с полевыми измерениями. Предикторные переменные рассматриваемых моделей были более важны, чем алгоритмы для повышения точности оценок AGB. Модели машинного обучения были менее зависимы от предикторов, чем линейная регрессия. В целом, сравнительная оценка этого исследования послужила ориентиром для выбора комбинаций предикторов и алгоритмов для моделирования AGB леса.

Совместное использование данных Sentinel-1, ALOS-PALSAR-2 и Sentinel-2 позволяет проводить мелкомасштабное картирование наземной биомассы лесов методом пошаговых регрессий [Laurin et al., 2018]. Применение данных Sentinel-1 повышает точность оценок при условии учета конкретных групп и/или типов лесов на основе достаточного набора полевых измерений. Показана применимость съемки Sentinel-1 для местного картирования биомассы с высоким разрешением в условиях высокой сомкнутости лесов. Подтверждено значимое различие между данными, полученными в разные времена года.

2.2.4. Оценка биомассы по оптической глубине растительного покрова

Одно из применений дистанционного зондирования – это мониторинг динамики растительности и ее временных изменений как в региональном, так и в глобальном масштабе. Среди различных индексов, рассчитываемых на основе наблюдений из космоса для изучения растительности, выделяется оптическая глубина растительности (VOD – Vegetation Optical Depth), которая все чаще используется для мониторинга широкого спектра экологических переменных растительности. VOD основывается на интенсивности затухания

мощности излучения в слое растительного покрова в микроволновой области спектра. Оптическая глубина растительности может быть получена как из пассивных, так и из активных микроволновых наблюдений. VOD может быть рассчитана из радиолокационных данных разных частотных диапазонов (от Ka до L; $\lambda \sim 1-30$ см). Теоретические основы оценок VOD как для пассивных, так и для активных съемочных систем представлены в работе [Frappart et al., 2020]. VOD рассчитывается по данным различных радиометров, например, SSMR, SSM/I, TMI, AMSR, AMSR-E, SMOS и т. д. [Frappart et al., 2020]. В настоящее время существуют несколько глобальных долгосрочных продуктов VOD, например, LPDR Version 2 (http://files.ntsg.umt.edu/data/LPDR_v2/), VODCA или LPRM Version 6 (<https://zenodo.org/record/2575599#.YeMSiWhByUk>). Расчет VOD возможен по данным активной съемки высокого пространственного разрешения Sentinel-1, JERS-1, PALSAR-1 и -2. Применение VOD является перспективным для оценки параметров растительного покрова, позволяет извлечь дополнительную информацию и имеет ряд преимуществ по сравнению с вегетационными индексами (NDVI, LAI, FPAR и др.), получаемыми на основе мультиспектральных данных. Преимуществом пассивной микроволновой VOD является высокий порог насыщения, что дает возможность получать достоверные оценки биомассы при ее относительно высоких значениях, тогда как для иных продуктов дистанционного зондирования быстрое насыщение оборачивается существенной проблемой. Основной недостаток таких данных – низкое пространственное разрешение (10 км и более) вследствие малой величины микроволнового излучения естественных источников Земли. Поэтому полевые измерения из-за своего небольшого территориального охвата не могут применяться непосредственно для установления связи между VOD и AGB. Вместо этого используется метод косвенной калибровки, в котором связь VOD с AGB моделируется с помощью эталонной карты запасов углерода, полученной в результате предыдущих исследований. Однако такая калибровка влияет на точность результатов в зависимости от надежности данных. В качестве эталонных карт биомассы обычно используются

глобальные карты. Например, GlobBiomass – глобальный набор данных о лесной биомассе (<https://globbiomass.org>); глобальная лесная биомасса GEOCARBON (<http://lucid.wur.nl/?viewDataset=9>); глобальная карта запасов лесов, биомассы и углерода на основе статистики ФАО (<https://web.archive.iiasa.ac.at/Research/FOR/biomass.html>); глобальные 1-градусные карты лесных площадей, запасов углерода и биомассы, 1950–2010 гг. (https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/Global_Biomass_1950-2010.html); глобальные наборы данных о надземной биомассе лесов за 2010, 2017 и 2018 годы, версии 3 (<https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/5f331c418e9f4935b8eb1b836f8a91b8>); глобальные карты плотности углерода надземной и подземной биомассы за 2010 год (https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=1763).

В исследовании [Momen et al., 2017] разработана модель связи VOD с водным потенциалом листовой (leaf water potential, LWP) и биомассой деревьев. Указано, что при анализе динамики VOD необходимо учитывать влагосодержание, недостаток которого может приводить к водному стрессу. Чувствительность динамики VOD к водному потенциалу листовой позволяет исследовать экогидрологические процессы в растениях и растительных ландшафтах.

Анализ озеленения Южно-Китайского карстового региона в [Brandt et al., 2018] на основе пассивных микроволновых спутниковых наблюдений показал, что VOD в L-диапазоне (L-VOD) по сравнению с VOD в X-диапазоне (X-VOD) более чувствителен и не вызывает проблемы насыщения для растительности с высокой сомкнутостью. Наблюдается почти линейная связь L-VOD с живой надземной биомассой. Применение VOD является актуальным для регионального и глобального мониторинга биомассы в контексте китайских правительственных инициатив и экологических оценок.

Данные VOD, полученные из спутниковых наблюдений SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) в L-диапазоне, значительно коррелируют ($r > 0,9$) с биомассой бореальных лесов без явных признаков насыщения [Rodriguez-Fernandez et al., 2018; Mialon et al., 2020]. Для густых лесов в северных широтах связь менее прямолинейна, чем для тропиков. Тесная

связь между L-VOD и AGB объясняется высокой надежностью методов и наблюдений, используемых для оценки AGB. При выборе данных SMOS L-VOD необходимо учитывать климатические условия (отсутствие снега в северных широтах, учет водных объектов) и разработать стратегию валидации оценок по полевым измерениям, представляющими пиксель SMOS (~40 км). Из-за высокой частоты съемки и чувствительности к AGB данные SMOS L-VOD являются перспективными для изучения и мониторинга эволюции экосистем северных широт и глобальных исследований запасов углерода.

Существует несколько подходов для установления связи VOD с AGB. Например, в работе [Liu et al., 2015] представлена методика расчета AGB, использованная для анализа изменений надземной биомассы в мире, которая включала следующие шаги: 1) ранжирование по группам подходящих пикселей в порядке возрастания значений VOD; 2) расчет средних значений VOD и AGB, 5-го и 95-го перцентилей AGB для каждой группы; 3) подбор параметров уравнения для прогнозирования среднего значения AGB и соответствующих перцентилей методом минимизации среднеквадратичной ошибки (RMSE). Итоговое уравнение [Liu et al., 2015] имеет вид

$$AGB = a \cdot \frac{\arctan(b \cdot (VOD - c)) - \arctan(b \cdot (0 - c))}{\arctan(b \cdot (Inf - c)) - \arctan(b \cdot (0 - c))} + d,$$

где AGB – значение надземной биомассы, взятой из эталонной карты; VOD – значение оптической глубины растительности; a , b , c , d – эмпирически подбираемые коэффициенты; Inf – бесконечность. Показано, что суммарная мировая надземная биомасса в 1998–2002 гг. составляла ~362 Пг. В течение 1992–2012 гг. мировые потери надземной биомассы составляли –0,07 Пг/год, однако в бореальной и умеренной зонах наблюдался рост на +0,13 Пг/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время существует ряд методов и технологий для оценки биомассы лесов для разных масштабных уровней. Чаще всего для оценки AGB используется L-диапазон РСА. На миссии, способные получать инфор-

мацию в Р-диапазоне, возлагаются большие надежды в области оценки запасов углерода. Существующие оценки биомассы созданы для конкретных годов и ограничены временем действия спутниковых миссий. Индекс оптической глубины растительности позволяет решить проблему насыщения при оценке биомассы. Временные серии VOD с различных датчиков за последние несколько десятилетий расширяют возможности по исследованию динамики биомассы лесов. Развитие лидарно-радиолокационных исследований является перспективным для непрерывного глобального картирования биомассы с улучшенной точностью [Kaasalainen et al., 2015].

В соответствии с публикациями методика оценки надземной биомассы по радиолокационным и спектрометрическим данным состоит из пяти этапов (рисунок): 1) получение исходных данных ДЗ и полевых материалов; 2) предварительная обработка данных; 3) извлечение данных о биомассе и соответствующих характеристик наземного покрова;

4) поиск статистической модели связи характеристик наземного покрова с оцениваемой биомассой; 5) проверка и необходимая доработка модели и рассчитанных карт биомассы.

На первом этапе (получение материалов съемки и полевых измерений) осуществляется получение исходных данных, которые проведены исследователем как необходимые для оценки биомассы и могут включать различные материалы дистанционного зондирования как с одного датчика, так и в их комбинации; репрезентативные параметры древостоев, полученные при полевых измерениях либо косвенными методами при помощи дистанционного зондирования; различные вспомогательные данные, например, климатические данные, маски лесной растительности и т. д. На втором этапе проводится их предварительная обработка для упрощения вычислений, уменьшения ошибок и неточностей. Обычно выполняется проверка исходных данных на пригодность для дальнейшего использования, выполнение



Обобщенная схема расчетов значений надземной биомассы по данным дистанционного зондирования

различных фильтраций и коррекций, а также, при необходимости, актуализация данных полевых исследований. Третий этап представляет собой получение необходимых признаков для формирования набора данных, которые будут использованы в следующем этапе для установления корреляций между ними. На четвертом этапе устанавливается зависимость между подготовленными исходными данными на прошлом этапе на основе модели, выбор которой зависит от объема исходной информации, источников данных, особенностей территории исследования, типов лесной растительности. В заключении (пятый этап) проводится оценка точности полученных результатов. Представленная схема меняется в зависимости от условий и требований проводимых исследований – некоторые действия могут исключаться или изменяться, а также могут быть включены дополнительные этапы. Например, на втором этапе может быть добавлено применение моделей хода роста древостоев для актуализации устаревших наземных данных.

Таким образом, методики оценки наземной биомассы на основе радиолокационных данных дистанционного зондирования позволяют косвенно оценить наземную живую биомассу лесных экосистем на основе анализа измеряемых пространственно-временных характеристик наземного покрова с приемлемой точностью. Получаемые результаты требуют их валидации с помощью полевых или иных истинных данных. По сравнению с традиционными полевыми измерениями радиолокационные данные дистанционного зондирования дают возможность получать оперативные оценки биомассы и анализировать динамику на основе временных серий карт. На точность получаемых оценок биомассы, помимо выбранной методики, значительно оказывают влияние условия съемки и параметры наземной поверхности. Сравнение методик по точности расчета биомассы затруднено из-за отсутствия единых подходов проведения экспериментов и вычислений погрешностей. В среднем, ошибки оценок биомассы на основе оптических и радиолокационных данных составляют ~25 %.

Одним из аспектов практического применения изложенной в работе информации является ее использование для оценки динамики

надземной биомассы лесов Сибири, оказывающих значимое влияние на глобальные углеродные циклы в контексте современных изменений климата. Оценка биомассы бореальных лесов Сибири значительно затруднена из-за малого количества актуальных опорных полевых материалов. Рассмотренные публикации только частично охватывали Сибирь, за исключением глобальных оценок с пространственным разрешением более 100 м [Wagner et al., 2003; Santoro et al., 2007, 2015, 2018, 2020, 2021; Stelmaszczuk-Górska et al., 2016, 2018].

В настоящее время для современной оценки биомассы лесов Сибири является перспективным применение алгоритмов машинного обучения к общедоступным данным радиолокационного дистанционного зондирования со спутников Sentinel-1 и ALOS-PALSAR, обладающих высоким пространственным разрешением (~10 м), совместно с данными спектродоиметрической и лидарной съемки.

Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-17-20012, <https://rscf.ru/project/22-17-20012/> при паритетной финансовой поддержке Правительства Республики Хакасия.

ЛИТЕРАТУРА

- Демаков Ю. П., Пурыев А. С., Черных В. Л., Черных Л. В. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2(26). С. 19–36.
- Сочилова Е. Н., Сурков Н. В., Ершов Д. В., Хамедов В. А. Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) // Вопр. лесн. науки. 2018. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zapasov-fitomassy-lesnyh-porod-po-sputnikovym-izobrazheniyam-vysokogo-prostranstvennogo-razresheniya-na-primere-lesov-hanty> (дата обращения: 22.10.2021).
- Усольцев В. А., Ковязин В. Ф., Цепордей И. С., Часовских В. П., Азаренок В. А. Биомасса ассимиляционного аппарата лесов Евразии: коррекция методов эмпирического моделирования // Изв. СПб. лесотехн. академии. 2020. Вып. 232. С. 50–78.
- Argamosa R., Blanco A., Baloloy A., Candido C., Dumlalag J. B. L., Dimapilis L., Paringit E. Modelling above ground biomass of mangrove forest using Sentinel-1 imagery // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2018. Vol. IV-3. P. 13–20.
- Attema E. P. W., Ulaby F. T. Vegetation modeled as a water cloud // Radio Sci. 1978. Vol. 13. P. 357–364.
- Barbosa J. M., Broadbent E. N., Bitencourt M. D. Remote sensing of aboveground biomass in tropical secondary forests: a review // Int. J. For. Res. 2014. Article ID715796.

- Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2018. Vol. 115 (25). P. 6506–6511.
- Brandt M., Wigneron J.-P., Chave J., Tagesson T., Penuelas J., Ciais P., Rasmussen K., Tian F., Mbow C., Al-Yaari A., Rodriguez-Fernandez N., Schurgers G., Zhang W., Chang J., Kerr Y., Verger A., Tucker C., Mialon A., Rasmussen L., Fensholt R. Satellite passive microwaves reveal recent climate-induced carbon losses in African drylands // *Nat. Ecol. Evol.* 2018. Vol. 2. P. 827–835.
- Brandt M., Yue Y., Wigneron J. P., Tong X., Tian F., Jepsen M. R., Xiao X., Verger A., Mialon A., Al-yaari A., Wang K., Fensholt R. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China Karst during recent decade // *Earth's Future*. 2018. Vol. 6 (7). P. 1017–1028.
- Breiman L. Random forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. P. 5–32.
- Cartus O., Santoro M., Kelldorfer J. Mapping forest aboveground biomass in the Northeastern United States with ALOS PALSAR dual-polarization L-band // *Remote Sens. Environ.* 2012. Vol. 124. P. 466–478.
- Chen L., Wang Y., Ren C., Zhang B., Wang Z. Optimal combination of predictors and algorithms for forest above-ground biomass mapping from Sentinel and SRTM data // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11 (4). P. 414.
- Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system // *Proc. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. Knowl. Discov. Data Min. (KDD '16)*. New York: Association for Computing Machinery, 2016. P. 785–794.
- Cutler M. E. J., Boyd D. S., Foody G. M., Vetrivel A. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: an assessment of predictions between regions // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2012. Vol. 70. P. 66–77.
- Del Frate F., Solimini D. On neural network algorithms for retrieving forest biomass from SAR data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004. Vol. 42 (1). P. 24–34.
- Dong J., Kaufmann R. K., Myneni R. B., Tucker C. J., Kauppi P. E., Liski J., Buermann W., Alexeyev V., Hughes M. K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks // *Remote Sens. Environ.* 2003. Vol. 84 (3). P. 393–410.
- Frappart F., Wigneron J.-P., Li X., Liu X., Al-Yaari A., Fan L., Wang M., Moisy C., le Masson E., Aoulad Lafkih Z., Vallé C., Ygorra B., Baghdadi N. Global monitoring of the vegetation dynamics from the vegetation optical depth (VOD): a review // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. Article ID2915.
- Ghasemi N., Sahebi M. R., Mohammadzadeh A. A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data // *Int. J. Geomat. Geosci.* 2011. Vol. 1 (4). P. 776–788.
- Global forest resources assessment 2020: Main report. Rome, Italy: FAO, 2020. 184 p.
- Han H., Wan R., Li B. Estimating forest aboveground biomass using Gaofen-1 images, Sentinel-1 images, and machine learning algorithms: a case study of the Dabie Mountain region, China // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14 (1). Article ID176.
- Herold M., Carter S., Avitabile V., Espejo A. B., Jonckheere I., Lucas R., McRoberts R. E., Næsset E., Nightingale J., Petersen R., Reiche J., Romijn E., Rosenqvist A., Rozendaal D. M. A., Martin Seifert F., Sanz M. J., de Sy V. The Role and need for space-based forest biomass-related measurements in environmental management and policy // *Surv. Geophys.* 2019. Vol. 40. P. 757–778.
- Houghton R. A., Butman D. E., Bunn A. G., Krankina O. N., Schlesinger P., Stone T. A. Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories // *Environ. Res. Lett.* 2007. Vol. 2. Article ID045032.
- Huang W., Sun G., Zhang Z., Ni W., Dubayah R. Sensitivity of multi-source SAR backscatter to changes in forest aboveground biomass // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7 (8). P. 9587–9609.
- Huang X., Ziniti B., Torbick N., Ducey M. J. Assessment of forest above ground biomass estimation using multi-temporal C-band Sentinel-1 and polarimetric L-band PALSAR-2 data // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. Article ID1424.
- Joshi N., Mitchard E., Schumacher J., Johannsen V. K., Saatchi S., Fensholt R. L-Band SAR backscatter related to forest cover, height and aboveground biomass at multiple spatial scales across Denmark // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7. P. 4442–4472.
- Kaasalainen S., Holopainen M., Karjalainen M., Vastaranta M., Kankare V., Karila K., Osmanoglu B. Combining lidar and synthetic aperture radar data to estimate forest biomass: status and prospects // *Forests.* 2015. Vol. 6. P. 252–270.
- Kumar L., Sinha P., Taylor S., Alqurashi A. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation // *Remote Sens.* 2015. Vol. 9 (1). Article ID097696.
- Kuplich T., Curran P., Atkinson P. Relating SAR image texture to the biomass of regenerating tropical forests // *Int. J. Remote Sens.* 2005. Vol. 26. P. 4829–4854.
- Laurin G. V., Balling J., Corona P., Mattioli W., Papale D., Puletti N., Rizzo M., Truckenbrodt J., Urban M. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data // *J. Appl. Remote Sens.* 2018. Vol. 12 (1). Article ID016008.
- Li W., Chen E., Li Z., Zhang W., Chang J. Assessing performance of Tomo-SAR and backscattering coefficient for hemi-boreal forest aboveground biomass estimation // *J. Indian Soc. Remote Sens.* 2015. Vol. 44. P. 41–48.
- Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Article ID9952.
- Liu Y. Y., van Dijk A. I. J. M., de Jeu R. A. M., Canadell J. G., McCabe M. F., Evans J. P., Wang G. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // *Nat. Clim. Change.* 2015. Vol. 5. P. 470–474.
- Lovynska V., Buchavyyi Y., Lakyda P., Sytnyk S., Gritzan Y., Sendziuk R. Assessment of pine aboveground biomass within Northern Steppe of Ukraine using Sentinel-2 data // *J. For. Sci.* 2020. Vol. 66. P. 339–348.
- Mette T., Papathanassiou K. P., Hajnsek I., Zimmermann R. Forest biomass estimation using polarimetric SAR interferometry // *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 2002. Vol. 2. P. 817–819.
- Mialon A., Rodriguez-Fernandez N., Santoro M., Saatchi S., Mermoz S., Bousquet E., Kerr Y. Evaluation of the sensitivity of SMOS L-VOD to forest above-ground biomass at global scale // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. Article ID1450.
- Mitchard E., Saatchi S., Woodhouse I., Nangendo G., Ribeiro N., Williams M., Ryan C., Lewis S., Feldpausch T.,

- Meir P. Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: a consistent relationship across four different African landscapes // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36 (23).
- Momen M., Wood J., Novick K., Pangle R., Pockman W., McDowell N., Konings A. Interacting effects of leaf water potential and biomass on vegetation optical depth // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2017. Vol. 122 (11). P. 3031–3046.
- Morin D., Planells M., Guyon D., Villard L., Mermoz S., Bouvet A., Thevenon H., Dejoux J.-F., le Toan T., Dedieu G. Estimation and mapping of forest structure parameters from open access satellite images: development of a generic method with a study case on coniferous plantation // *Remote Sens. Environ.* 2019. Vol. 11 (11). Article ID1275.
- Næsset E., Bollandsås O., Gobakken T., Gregoire T. Model-assisted estimation of change in forest biomass over an 11 year period in a sample survey supported by airborne LiDAR: a case study with post-stratification to provide “activity data” // *Remote Sens. Environ.* 2013. Vol. 128. P. 299–314.
- Nguyen Viet L., Kieu L., Tu T., Hồng T. Seasonal effects of backscattering intensity of ALOS-2 PALSAR-2 (L-Band) on retrieval forest biomass in the tropics // *J. Geosci. Environ. Protection.* 2020. Vol. 8. P. 26–40.
- Norovsuren B., Batchuluun T., Batomunkuev V., Renchin T. Estimation for forest biomass and coverage using satellite data in small scale area, Mongolia // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 320. Article ID012019.
- Omar H., Misman M. A., Kassim A. R. Synergetic of PALSAR-2 and Sentinel-1A SAR Polarimetry for retrieving aboveground biomass in dipterocarp forest of Malaysia // *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7. Article ID675.
- Pandey U., Kushwaha S., Kachhwaha T., Kunwar D., Dadhwal V. Potential of Envisat ASAR data for woody biomass assessment // *Trop. Ecol.* 2010. Vol. 51. P. 117–124.
- Persson H., Jonzén J., Nilsson M. Combining TanDEM-X and Sentinel-2 for large-area species-wise prediction of forest biomass and volume // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2021. Vol. 96. Article ID102275.
- Phillips S. J., Anderson R. P., Schapire R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecol. Model.* 2006. Vol. 190. P. 231–259.
- Rodriguez-Fernandez N., Mialon A., Mermoz S., Bouvet A., Richaume P., Al Bitar A., Al-Yaari A., Brandt M., Kaminski T., le Toan T., Kerr Y., Wigneron J.-P. An evaluation of SMOS L-band vegetation optical depth (L-VOD) data sets: High sensitivity of L-VOD to above-ground biomass in Africa // *Biogeosciences.* 2018. Vol. 15. P. 4627–4645.
- Ronoud G., Fatehi P., Darvishsefat A., Tomppo E., Praks J., Schaepman M. Multi-sensor aboveground biomass estimation in the broadleaved hyrcanian forest of Iran // *Can. J. Remote Sens.* 2021. Vol. 47. P. 818–834.
- Saatchi S., Harris N., Brown S., Lefsky M., Mitchard E., Salas W., Zutta B., Buermann W., Lewis S., Hagen S., Petrova S., White L., Silman M., Morel A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2008. Vol. 108. P. 9899–9904.
- Saatchi S., Houghton R., dos Santos Alvalá R. C., Soares J. V., João Yu Y. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin // *Glob. Change Biol.* 2007. Vol. 13. P. 816–837.
- Saatchi S., Marlier M., Chazdon R., Clark D., Russell A. Impact of spatial variability of forest structure on radar estimation of aboveground biomass // *Remote Sens. Environ.* 2011. Vol. 115. P. 2836–2849.
- Santi E., Chiesi M., Fontanelli G., Lapini A., Paloscia S., Pettinato S., Ramat G., Santurri L. Mapping woody volume of mediterranean forests by using SAR and machine learning: a case study in Central Italy // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. Article ID809.
- Santoro M., Beaudoin A., Beer C., Cartus O., Fransson J., Hall R. J., Pathe C., Schmullius C., Shvidenko A., Schepaschenko D., Thurner M., Wegmüller U. Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR // *Remote Sens. Environ.* 2015. Vol. 168. P. 316–334.
- Santoro M., Beer C., Cartus O., Schmullius C., Shvidenko A., McCallum I., Wegmüller U., Wiesmann A. The BIOMASAR algorithm: An approach for retrieval of forest growing stock volume using stacks of multi-temporal SAR data // *Proc. ESA Living Planet Symp.* 2010. <http://pure.iiasa.ac.at/9430>
- Santoro M., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Wegmüller U., Wiesmann A., Schmullius C. Comparison of forest biomass estimates in Siberia using spaceborne SAR, inventory-based information and the LPJ dynamic global vegetation model // *ESA ENVISAT Symp.* 2007. <http://pure.iiasa.ac.at/8394>
- Santoro M., Cartus O., Carvalhais N., Rozendaal D., Avitabile V., Araza A., de Bruin S., Herold M., Quegan S., Rodriguez-Veiga P., Balzter H., Carreiras J., Schepaschenko D., Korets M., Shimada M., Itoh T., Martínez Á. M., Cavlovic J., Gatti R. C., da Conceição Bispo P., Dewnath N., Labrière N., Liang J., Lindsell J., Mitchard E. T. A., Morel A., Pascagaza A. M. P., Ryan C. M., Slik F., Laurin G. V., Verbeeck H., Wijaya A., Willcock S. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations // *Earth Syst. Sci. Data.* 2021. Vol. 13. P. 3927–3950.
- Santoro M., Cartus O., Fransson J. E. S., Shvidenko A., McCallum I., Hall R. J., Beaudoin A., Beer C., Schmullius C. Estimates of forest growing stock volume for Sweden, Central Siberia, and Québec using Envisat advanced synthetic aperture radar backscatter data // *Remote Sens.* 2013. Vol. 5 (9). P. 4503–4532.
- Santoro M., Cartus O., Mermoz S., Bouvet A., le Toan T., Carvalhais N., Rozendaal D., Herold M., Avitabile V., Quegan S., Carreiras J., Rauste Y., Balzter H., Schmullius C., Seifert F. M. A detailed portrait of the forest aboveground biomass pool for the year 2010 obtained from multiple remote sensing observations // *Geophys. Res. Abstr.* 2018. Vol. 20. P. 18932.
- Sarker M., Nichol J. Improved forest biomass estimates using ALOS AVNIR-2 texture indices // *Remote Sens. Environ.* 2011. Vol. 115. P. 968–977.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shechepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. Article ID12825.
- Schlund M., Kotowska M. M., Brambach F., Hein J., Wesel B., Camarretta N., Silalahi M., Jaya N. S., Erasmi S., Leuschner C., Kreft H. spaceborne height models reveal above ground biomass changes in tropical landscapes // *For. Ecol. Manag.* 2021. Vol. 497. Article ID119497.

- Sessa R., Han A. J. D. Terrestrial essential climate variables for climate change assessment, mitigation and adaptation (GTOS52 – biennial report supplement). Rome: FAO, 2008. 44 p. <https://www.fao.org/3/i0197e/i0197e.pdf>
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Boulouï Y. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // *Ecol. Model.* 2007. Vol. 204. P. 163–179.
- Stelmaszczuk-Górska M. A., Rodriguez-Veiga P., Ackermann N., Thiel C., Balzter H., Schmillius C. Non-parametric retrieval of aboveground biomass in siberian boreal forests with ALOS PALSAR interferometric coherence and backscatter intensity // *J. Imaging.* 2016. Vol. 2 (1). P. 1.
- Stelmaszczuk-Górska M. A., Urbazaev M., Schmillius C., Thiel C. Estimation of above-ground biomass over boreal forests in Siberia using updated in situ, ALOS-2 PALSAR-2, and RADARSAT-2 data // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. Article ID1550.
- Strunk J. L., Temesgen H., Andersen H. E., Packalen P. Prediction of Forest Attributes with Field Plots, Landsat, and a Sample of Lidar Strips // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2014. Vol. 80 (2). P. 143–150.
- Su H., Shen W., Wang J., Ali A., Li M. Machine learning and geostatistical approaches for estimating aboveground biomass in Chinese subtropical forests // *For. Ecosyst.* 2020. Vol. 7. Article ID64.
- Usoltsev V. A., Chasovskikh V. P., Noritsina Yu. V., Noritsin D. V. Allometric models of tree biomass for airborne laser scanning and ground inventory of carbon pool in the forests of Eurasia: Comparative analysis // *Sibirskiy lesnoy zhurnal (Siberian Journal of Forest Science)*. 2016. Vol. 4. P. 68–76 (in Russian with English abstract).
- Vashum K. T., Jayakumar S. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests – a review // *J. Ecosyst. Ecogr.* 2012. Vol. 2. P. 116.
- Wagner W., Luckman A., Vietmeier J., Tansey K., Balzter H., Schmillius C., Davidson M., Gaveau D., Gluck M., le Toan T., Quegan S., Shvidenko A., Wiesmann A., Yu J. Large-scale mapping of boreal forest in SIBERIA using ERS tandem coherence and JERS backscatter data // *Remote Sens. Environ.* 2003. Vol. 85 (2). P. 125–144.
- Wang G., Wang N., Guo W. Modelling forest aboveground biomass based on GF-3 dual-polarized and WorldView-3 data: a case study in Datong National Wetland Park, China // *Math. Probl. Eng.* 2021. Vol. 2021. Article ID9925940.
- Wang Y., Zhang X., Guo Z. Estimation of tree height and aboveground biomass of coniferous forests in North China using stereo ZY-3, multispectral Sentinel-2, and DEM data // *Ecol. Indic.* 2021. Vol. 126. Article ID107645.
- Xiangxing W., Li Z., Chen E., Zhao L., Zhang W., Xu K. Forest aboveground biomass estimation using multi-features extracted by fitting vertical backscattered power profile of tomographic SAR // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13 (2). Article ID186.
- Xu L., Saatchi S. S., Yang Y., Yu Y., Pongratz J., Bloom A. A., Bowman K., Worden J., Liu J., Yin Y., Domke G., McRoberts R. E., Woodall C., Nabuurs G. J., de-Miguel S., Keller M., Harris N., Maxwell S., Schimel D. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century // *Sci. Adv.* 2021. Vol. 7 (27).

Assessment of above-ground forest biomass by radar methods

I. A. BABIY¹, S. T. IM^{1, 2, 3, 4}, V. I. KHARUK^{2, 3}

¹*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
660014, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochoy av., 31*

²*Sukachev Institute of Forest (department of FIC KSC SB RAS)
Siberian Branch Russian Academy of Sciences
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28*

³*Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny av., 79*

⁴*Katanov Khakassian State University
655017, Abakan, Lenin av., 90*

The dynamics of forest biomass in boreal forests have a significant impact on global carbon cycles. Biomass assessments contribute to understanding the carbon balance of forest vegetation in Siberia. This paper discusses methods for estimating above-ground forest biomass based on radar remote sensing data used in modern research (2010–2021). Methodologies used for biomass assessments are described, including stages of field research, data pre-processing, and modelling of the relationship of remote sensing (RS) data with

biomass. Radar sensing has limited capabilities for assessing forest biomass related to characteristics of the survey equipment and parameters of stands. In modern research, a combination of optical and radar data of RS is carried out, which allows to obtain more accurate assessment of biomass using regression models, machine learning, and special techniques (BIOMASAR, SWCM, MaxEnt). The use of data on the optical depth of vegetation cover, estimated from microwave survey data, makes it possible to solve the saturation problem when estimating large amounts of biomass. Comparison of the accuracy of biomass estimation methods is difficult due to the lack of uniform approaches to conducting experiments and calculating errors. Biomass assessment errors based on optical and radar data vary considerably, averaging ~25 %. The assessment of the biomass of boreal forests of Siberia is difficult due to the small amount of supporting field materials. Nowadays, to assess the biomass of boreal forests with a high spatial resolution, it is promising to develop methods based on machine learning algorithms for radar remote sensing data from the Sentinel-1 and ALOS-PALSAR satellites.

Key words: biomass, remote sensing, allometry, carbon, monitoring, SAR.