

**GPS, GLONASS AND GALILEO SIGNALS
IN MONITORING THE CONDITION OF THE TREES**

*Anatoliy V. Sorokin⁽¹⁾, Valery A. Ivanov⁽²⁾, Evgeny I. Ponomarev⁽¹⁾, Daniil S. Makarov⁽¹⁾,
Dmitriy V. Kharlamov⁽¹⁾, Dmitriy V. Golubev⁽³⁾*

⁽¹⁾Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

⁽²⁾Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

⁽³⁾Branch of FBI «Russian Centre of Forest Health» – «Centre of Forest Health
of Krasnoyarsk Krai», Krasnoyarsk, Russia

The variant of using signals from navigation satellites in the monitoring of the state of the forest stand affected by the Ussuri polygraph is considered. The method of radioscopy was tested to determine the state of the forest stand. Test measurements of the attenuation satellite signals of the L1 range in mixed areas of mixed forest were carried out. The possibilities of localization of sites with a fire-hazardous state of the forest stand were identified.

Key words: radioscopy, navigation satellite signals, monitoring, forest, Ussuri polygraph, humidity, fire hazard.

СИГНАЛЫ GPS, ГЛОНАСС И GALILEO В МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЯ

Сорокин А.В. ⁽¹⁾, Иванов В.А. ⁽²⁾, Пономарев Е.И. ⁽¹⁾, Макаров Д.С. ⁽¹⁾,
Харламов Д.В. ⁽¹⁾, Голубев Д.В. ⁽³⁾

⁽¹⁾ ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

⁽²⁾ СибГУ им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

⁽³⁾ Центр защиты леса Красноярского края, г. Красноярск

Рассмотрен вариант использования сигналов навигационных спутников в мониторинге состояния древостоя, пораженных полиграфом уссурийским. Апробирован метод радиоскопии для определения состояния древостоя. Проведены тестовые измерения погонных коэффициентов ослабления сигналов навигационных спутников диапазона L1 на участках смешанного леса. Выявлены возможности локализации участков с пожароопасным состоянием древостоя.

Ключевые слова: радиоскопия, сигналы навигационных спутников, мониторинг, лес, полиграф уссурийский, влажность, пожароопасность.

Введение. Изучение, оценка текущего и прогнозного состояния обширных лесных массивов требует использования объективных средств контроля и долговременного мониторинга, что в современных условиях перспективно проводить, используя спутниковые мониторинговые комплексы, в том числе глобальные навигационные спутниковые системы (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO).

К факторам, определяющим состояние лесной территории, можно отнести наличие ветровалов, вырубок, пожаров, поражений энтомофагами (сибирский шелкопряд, полиграф уссурийский и т.д.).

Другой аспект проблемы заключается в том, что климатические изменения, увеличивающаяся антропогенная нагрузка, нарушение лесных территорий (рубки, воздействие энтомофагов) [1, 2], приводят к повышению природной пожарной опасности и, следовательно, к увеличению горимости лесов [3 - 5]. В мониторинге пожарной опасности важную роль играет возможность контроля влагосодержания лесных горючих материалов, что определяет риски возникновения и распространения горения. Оценки и мониторинг влагосодержания лесных массивов также перспективно проводить, используя радиометрические данные различных спутниковых систем [6 - 7].

В лесных районах Сибири в качестве альтернативы можно использовать сигналы навигационных спутников для непрерывного мониторинга состояния древостоев и лесных горючих материалов. Например, методы радиоскопии древостоя и рефлектометрии лесного опада с использованием автономных специализированных приемников сигналов навигационных спутников позволяют эффективно оценивать влагосодержание лесных горючих материалов [8]. В качестве критерия динамики пожароопасного состояния можно использовать данные о последовательных съемках лесных участков. Периодичность повторения съемки может определяться скоростью достижения равновесного влагосодержания в зависимости от типа лесной подстилки. В среднем величина периода высыхания материалов лесного опада до равновесного значения влагосодержания составляет 100–150 часов [7].

В данной работе анализируется метод использования радиоскопии в диапазоне L1 для определения коэффициентов погонного ослабления сигналов GPS, ГЛОНАСС, Galileo и восстановления состояния древостоя, подвергнувшегося воздействию энтомофагов.

2. Источники зондирующего излучения. Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) высокотехнологичны и позволяют в непрерывном режиме, наряду с координатными измерениями, восстанавливать в реальном времени электрофизические параметры сред, с которыми взаимодействуют в процессе распространения. Системы ГНСС имеют значимый для мониторинга земных покровов ресурс – когерентные и поляризованные импульсные радиосигналы широкого диапазона частот, проходящие околоземное пространство с ионосферой и атмосферой, отраженное и рассеянное поверхностью покровов Земли. В каждой группировке по 24 рабочих спутников (27 для Galileo), которые работают на круговых орбитах с высотой 19100, 20183, 23224 метра для ГЛОНАСС, GPS, Galileo соответственно. Несущие частоты $L1=1575.42$ МГц для GPS и Galileo, и $L1 = 1602$ МГц $\pm K \cdot 562,5$ кГц, где $K = -7, -6, \dots, 6$ для ГЛОНАСС. Радиометрия изменений параметров сигнала, трансформируемого средами, позволяет восстанавливать значимые для практики электрофизические характеристики этих сред. Это коэффициенты отражения от границ раздела земных поверхностей, фазовые задержки и коэффициенты пропускания объемных сред – ионосферы, атмосферы, растительных, снежных и ледовых покровов.

Фактически навигационные спутниковые системы позволяют реализовать глобальный радиометр на рабочих частотах действующих группировок GPS, ГЛОНАСС и GALILEO. В течение одного часа приемная аппаратура регистрирует около 10-12 сканирующих серий сигналов, трансформируемых исследуемым объектом. Частота регистрируемых изменений параметров составляет 1 Гц [9]. Восстановление временных изменений характеристик сред земных покровов теоретически возможно во временных интервалах с дискретностью в 1 секунду. Пространственная локализация этих изменений ограничена точностью координатных измерений действующих навигационных систем.

Специфика взаимодействия сигналов ГНСС с объектами зондирования определяется параметрами зондирующего излучения и электрофизическими характеристиками земных покровов.

3. Метод измерений коэффициентов погонного ослабления. Радиоскопия лесных массивов осуществляется регистрацией сигналов, изменяющих свои характеристики в процессе прохождения древостоя. На рис. 2 представлена схема измерений в варианте расположения антенны вблизи границы лесного массива.

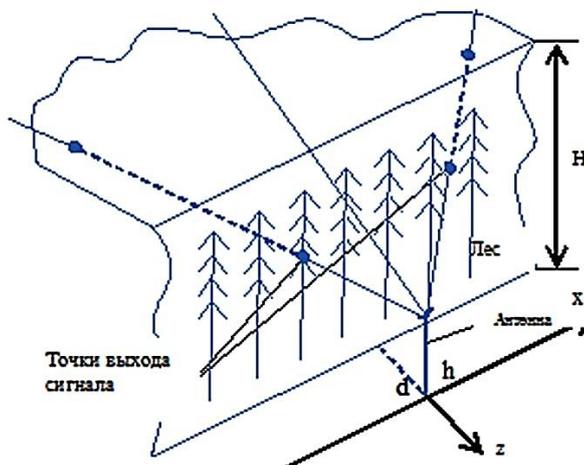


Рис. 2. Схема эксперимента по радиопросвечиванию древостоя

Пространственно-временные координаты положения навигационных спутников в сочетании с координатами расположения антенны и границы лесного массива позволяют однозначно определить траекторию трассы прохождения сигнала сквозь лесной массив и её перемещения в объеме древостоя. Это позволяет получать коэффициент погонного ослабления с последующим восстановлением фитомассы и влагосодержания древостоя с координатной привязкой [10]. Длина трассы (L), которую прошел сигнал в лесу, рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{(H - h) \cos(\alpha) - dtg(\varphi)}{\cos(\alpha) \sin(\varphi)}, \quad (1)$$

где H – средняя высота деревьев; h – высота расположения антенны; d – расстояние от антенны до кромки леса; α – азимут спутника; φ – угол возвышения спутника.

Сигнал, прошедший через свободное пространство, аппроксимируем с учетом формы полной кривой, полученной ранее для каждого спутника в базе данных характеристик прямых сигналов группировок ГНСС. Далее, с учетом положения максимума амплитуды при максимальном значении угла возвышения, экстраполируем функцию зависимости амплитуды прямого сигнала от времени на время прохождения сигнала через древостой. Для выбранных точек (кадров) на рис. 4Б, определяем амплитуды сигнала и соответствующие им длины трасс в лесу и рассчитываем значения коэффициента погонного ослабления γ :

$$\gamma = - \frac{10 \ln \frac{P}{P_0}}{L}, \quad (2)$$

где P – амплитуда сигнала, прошедшего через древостой; P_0 – амплитуда сигнала свободного пространства.

Изменения амплитуды сигналов ГНСС, возникающих при взаимодействии с объемом древостоя и учет вариаций характеристик прямых сигналов, позволяют восстанавливать его фитомассу и влагосодержание.

4. Натурные измерения. Измерения коэффициентов ослабления сигналов GPS и ГЛОНАСС проведены на участке Мининского лесничества 29.05.2019 г. Участок смешанного леса, с преобладанием в древостое пихты и кедра. Категория защитности: леса зеленой зоны поселения, хозяйственный объект. Средний возраст пихты и кедра 120 и 140 лет, высоты в интервале 18-24 м, объем древесины 210 м³/га. Место расположения антенны выбрано на просеке шириной 8 м в массиве леса, пораженного полиграфом уссурийским. с координатами 56°02'25.7"N 92°25'17.9"E. Спутниковый снимок соответствует здоровому состоянию лесного массива до 2012 г. - Рис. 3а. Современное состояние фрагмента древостоя представлено на Рис.3б.



а)



б)

Рис. 3. Тестовая площадка «Мининское лесничество»: а) спутниковый снимок неповрежденного древостоя, июнь 2012 года, б) фотография текущего состояния 29.05.2019 г.

В измерениях использована антенна AM 475 ГНСС L1/L2/L3, и специализированный автономный приемник-регистратор НСПП-04. Регистрировался сигнал диапазона L1 систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO. Высота расположения антенны над уровнем лесной подстилки 0,25 м. Ось диаграммы направленности антенны ориентирована вертикально. Антенна находилась на середине просеки, разделяющий лесной массив.

Продолжительность непрерывной регистрации составляла 2 часа 55 минут. Частота отсчетов составляла 1 Гц, число спутников от каждой группировки GPS, ГЛОНАСС, GALILEO за сеанс регистрации составило 18, 13 и 11 соответственно. Расположение антенны обеспечивало регистрацию сигналов ГЛОНАСС, GPS и Galileo, прошедших через массив леса и частично свободное пространство, в интервале углов азимута $0-360^{\circ}$ и углов возвышения $10-90^{\circ}$. Максимальная длина трассы прохождения сигнала в лесном массиве составляет около 100 м. Полярная диаграмма траекторий трех спутников и графики изменения амплитуды сигналов от времени (шкала кадров, шаг 1 с.) представлены на рис.4.

5. Результаты и обсуждение. Анализ записей сигналов радиопросвечивания позволил выявить динамику амплитуды сигналов спутников в соответствии со степенью нарушенности древостоя восточного (ГЛОНАСС 10) и западного (GPS 18, GALILEO 11) участков. Отличие древостоя участков состояло в различной плотности деревьев пораженной пихты и здоровых кедров. Изменения амплитуды зондирующего сигнала определяются плотностью фитомассы

стволовой древесины и её влагосодержания. Среднее значение влагосодержания образцов древесины пораженных деревьев по зондируемому участку составило 27%.

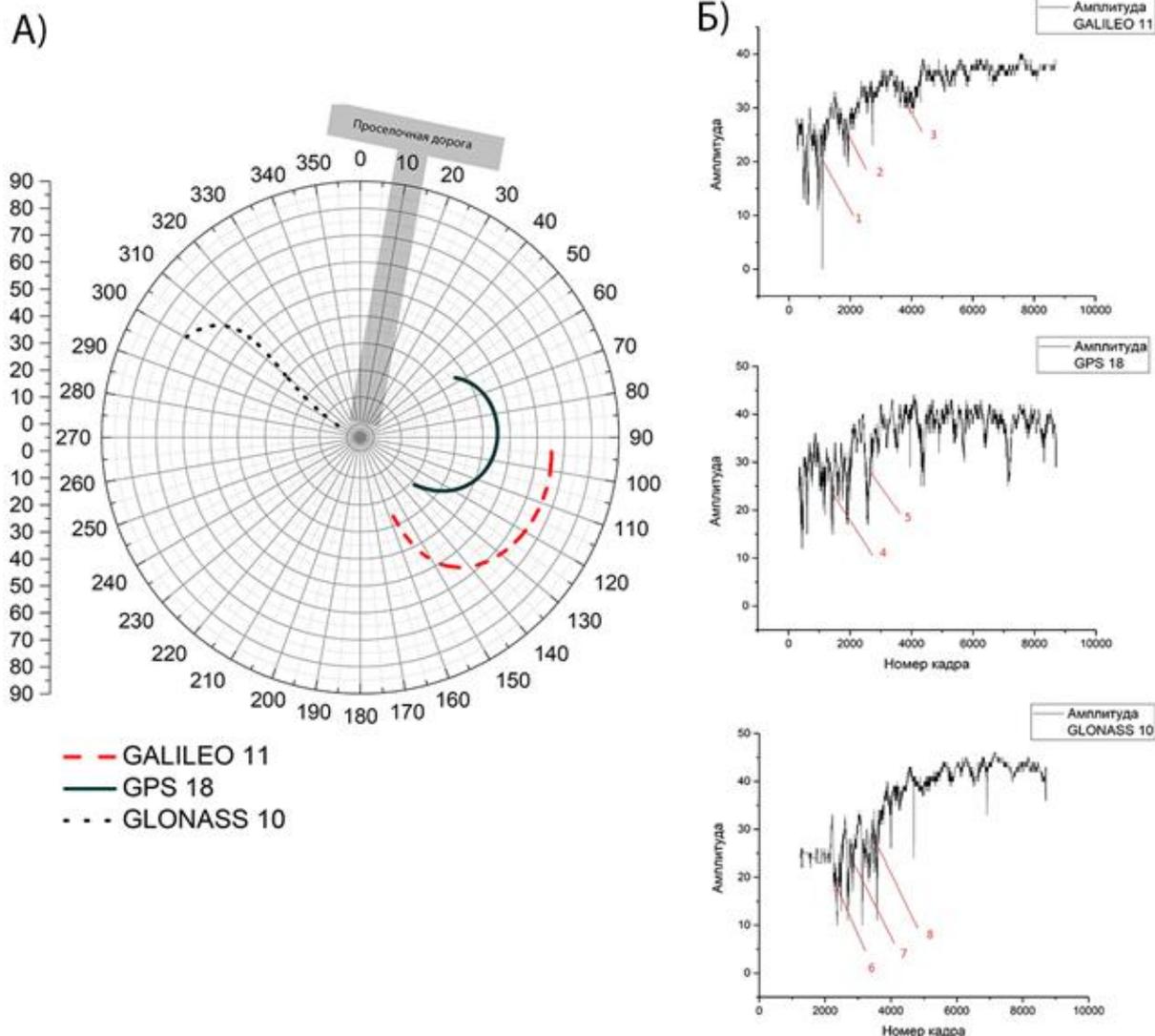


Рис. 4. А) Полярная диаграмма траектории спутников GALILEO 11, GPS18, GLONASS 10. Б) Амплитуда сигналов спутников при прохождении через древостой

Угловые координаты источника сигналов азимут α , угол возвышения φ , средняя высота древостоя H , высота расположения антенны h и расстояние от антенны до кромки леса d позволяют определить погонный коэффициент ослабления γ с координатной привязкой траектории прохождения сигнала к точке размещения антенны.

Результаты обработки данных трех спутников для траекторий сигнала, дающих значения амплитуд в точках 1-8, указанных на рис. 4Б, представлены в таблице. Относительные изменения этих коэффициентов позволяют фиксировать границу здоровых и пораженных участков древостоя, их временную динамику. Имеется возможность оперативного восстановления влажности древостоя с использованием диэлектрической модели, адаптированной к видовой и возрастной особенностям древостоя, его состояния и рельефу почвы.

Таблица. Значения коэффициентов погонного ослабления γ .

Спутники	GALILEO 11			GPS 18		ГЛОНАСС 10		
Траектория	1	2	3	4	5	6	7	8
γ	0,11	0,14	0,08	0,19	0,10	1,01	0,63	0,37

Вариации коэффициента погонного ослабления, представленные в таблице, связаны с наличием неоднородностей эффективной диэлектрической проницаемости древостоя, формируемых живыми кедром и разряженными участками древостоя пораженных деревьев пихты.

Заключение. Рассмотрен вариант использования сигналов навигационных спутников в мониторинге состоянии лесных массивов, пораженных полиграфом уссурийским. Проведены тестовые измерения погонных коэффициентов ослабления сигналов навигационных спутников диапазона L1 участков смешанного леса. Сделан вывод о возможности использования относительных изменений коэффициентов погонного ослабления с временной динамикой для определения границ здоровых и пораженных участков древостоя. Перспективна разработка диэлектрических моделей древостоя, адаптированных к его состоянию, видовым и возрастным особенностям и рельефу почвы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Иванов В.А., Москальченко С.А., Пономарёв Е.И.* Влияние нарушенных лесных территорий на частоту пожаров в Нижнем Приангарье // Хвойные бореальной зоны. – СибГТУ, 2009, т. 26, №2. – С. 249 – 254.
- [2] *Харук В.И., Антамошкина О.А.* Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий // Сибирский экологический журнал. 2017. Т. 24. № 5. С. 647-654.
- [3] *Conard S.G., Ivanova G.A.* Wildfire in Russian boreal forests-potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates // Environmental Pollution. 1997. V.98. P. 305-313.
- [4] *Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Csiszar I., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G., Loboda T.* Satellite Monitoring Of Forest Fires in Russia at Federal And Regional Levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V. 11. N. 1. P. 113–145.
- [5] *Пonomarev E. И., Харук В. И.* Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экологич. журн. 2016. № 1. С. 38–46. doi: 10.15372/SEJ20160104. [*Ponomarev E. I., Kharuk V. I.* Wildfire Occurrence in Forests of the Altai–Sayan Region under Current Climate Changes // Cont. Probl. of Ecol. 2016. V. 9. N. 1. P. 29–36. doi: 10.1134/S199542551601011X].
- [6] *Сухинин А.И., Пonomarev Е.И.* Картирование и краткосрочное прогнозирование пожарной опасности в лесах Восточной Сибири по спутниковым данным. // Сибирский экологический журнал, т. 10, №6, 2003. – С. 669 – 675.
- [7] *Сухинин А., Пonomarev Е.* Оценка влагосодержания лесных горючих материалов по радиационной температуре // Деп. в ВИНТИ. 1998. №1144-В98, 26 с.
- [8] *Сорокин А. В., Подопригора В. Г., Фомин С. В., Савин И. В.* Эволюция характеристик сигналов навигационных спутников в лесу. Известия вузов. Физика. 2017, Т. 60. № 12/2. С. 19-22.
- [9] *Jin S., Cardellach E., Xie F.* GNSS Remote Sensing. New York, London.: Springer Dordrecht Heidelberg,. 2014. 286 p.
- [10] Пат. 2 682 718 Российской Федерации. МПК G01S 19/03 (2010.01) Способ определения коэффициентов погонного ослабления сигналов навигационных космических аппаратов в лесном массиве с координатной привязкой // *Макаров Д.С., Савин И.В., Сорокин А.В., Фомин С.В. Харламов Д.В.* № 2018119448; заявл.25.05.2018; опубл. 21.03.2019, Бюл. № 9. 8 с.