

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА УСПЕШНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СЕВЕРНЫХ ОЛЕНЕЙ (*RANGIFER TARANDUS*) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ “ARGOS”

© 2024 г. В. Н. Мамонтов^{а,*}, А. Л. Сальман^{б,**}

^а ФГБУН “Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени Академика Н.П. Лаврова
Уральского отделения Российской академии наук”, Архангельск, 163020 Россия

ООО “ЭС-ПАС”, Москва, 125171 Россия

*e-mail: mamont1965@list.ru

**e-mail: a.salman@es-pas.com

Поступила в редакцию 29.04.2024 г.

После доработки 16.08.2024 г.

Принята к публикации 17.09.2024 г.

В настоящее время в экологических исследованиях все активнее используются средства спутниковой телеметрии. В результате исследователи получают большой массив данных об использовании пространства животными. Но, несмотря на совершенство современных спутниковых систем навигации и передачи данных, сообщения о позициях животных поступают крайне неравномерно. В данной статье мы рассматриваем основные технические и природные факторы, которые могут оказывать влияние на успешность получения космическими аппаратами спутниковой системы “Argos” сообщений, излучаемых установленными на животных радиомаяками. Показано, что из природных факторов во время нахождения животного под пологом леса в наибольшей степени влияет сомкнутость крон деревьев. Данное влияние может нивелироваться обилием снега в кронах после сильных снегопадов. Более слабое влияние оказывает плотная облачность. Из технических факторов, связанных с особенностями пролетов спутников системы “Argos”, успешность приема сообщений обуславливают, прежде всего, максимальный угол подъема спутника над линией горизонта и интенсивность пролетов спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом более 10°, в единицу времени. Этими факторами определяется значительная неравномерность получения сообщений. В ночные часы и около полудня в связи с сокращением количества пролетов спутников и снижением высоты их траекторий успешность приема сообщений (количество принятых сообщений от количества передаваемых ошейниками) может снижаться до 3%.

Ключевые слова: спутниковая телеметрия, спутниковая система “Argos”, перемещения животных, прием сообщений спутниками

DOI: 10.31857/S0044513424090089, EDN: triqvu

В последние десятилетия в экологических исследованиях все чаще используются методы, основанные на анализе данных спутниковой телеметрии перемещений животных (Amstrup et al., 2004; Cagnacci et al., 2010; Coxen et al., 2017; Walton et al., 2018; Csermak-Jr et al., 2022; Leonard et al., 2020 и др.). Применение GPS-модулей в ошейниках значительно повысило точность определения местоположений животных, особенно после начала активного использования технологии GNSS, представляющей собой комбинацию существующих спутниковых навигационных систем (GPS,

ГЛОНАСС, а в некоторых моделях также Galileo и Beidou) (Frair et al., 2010; Forin-Wiart et al., 2015; Fernandez-Rodriguez et al., 2023). Тем не менее существующие системы спутниковой телеметрии в определенных условиях могут передавать неточные данные о местоположении, что приводит к неправильным выводам о форме и площади индивидуального участка обитания, об интенсивности перемещений или к искажению результатов анализа выбора местообитаний (DeCesare et al., 2005; Sager-Fradkin et al., 2007; Webb et al., 2013; Garcia-Jimenez et al., 2020). Кроме того, наряду с точностью

определения местоположения животного, на результаты исследования большое влияние оказывает периодичность получения данных (Lombardi et al., 2022; Fernandez-Rodriguez et al., 2023). Важнейшим направлением экологических исследований с использованием спутниковой телеметрии перемещений животных является анализ выбора ресурса, результаты которого могут быть использованы при обосновании необходимости сохранения определенного набора местообитаний, наиболее интенсивно используемых животными в том или ином сезоне. Достоверность результатов анализа обеспечивается достаточностью размеров выборки, которая определяется количеством отслеживаемых животных и количеством полученных позиций каждой особи (Hebblewhite, Haydon, 2010; Street et al., 2021). Стрит с соавторами (Street et al., 2021) утверждает, что достоверность результатов анализа выбора ресурса в значительной степени зависит от вариабельности ландшафта в границах участка обитания и степени специализации вида, в некоторых случаях высокая достоверность может быть достигнута при малом количестве помеченных особей и небольшом количестве позиций. Следует заметить, что наряду с неточностью и пропусками географической привязки позиций под влиянием внешних факторов существует значительная неравномерность получения данных, отправляемых передатчиком ошейника с использованием космических аппаратов. Многие исследователи с целью избежать неравномерности поступления данных с участков с благоприятными или сложными условиями связи со спутником при анализе проводят стандартизацию данных, включая только часть полученных позиций (обычно в определенные часы дня) (De Groeve et al., 2020; Lombardi et al., 2021; Oeser, 2022). В данном случае сокращение количества позиций, особенно, при выборе 4–6 позиций в сутки, может привести к недостоверным выводам о размерах участка, используемого животным в течение суток. Следует также учесть, что циркадные ритмы животных обычно тесно связаны с изменением освещенности в результате смены времени суток, а в высоких широтах время восхода и захода солнца в разные периоды года может смещаться на 7–8 часов. В результате анализ распределения малого количества позиций в фиксированные часы суток без учета сезонной изменчивости длины светового дня может привести к исключению позиций, полученных в периоды максимальной активности либо пассивного отдыха. В этом случае могут быть сделаны неверные выводы об интенсивности использования животным пространства в течение суток или определенного сезона.

Как уже упоминалось, поступление данных с определенными местоположениями животных при непрерывной передаче в течение суток может

происходить крайне неравномерно, поэтому при стандартизации данных необходимо учитывать вероятность получения позиций в разное время суток. В данной статье мы пытаемся выяснить, какие внешние факторы влияют на интенсивность поступления сообщений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ

Исследование выполнено на юго-востоке Архангельской области (61.68° с.ш., 045.78° в.д.). Участок исследований представляет собой высокую (более 30 м над уровнем долины) надпойменную террасу Северной Двины, поросшую сосновыми лесами на песчаных почвах, с прилегающей к ней обширной болотной системой с крупными островами разреженных заболоченных лесов. Рельеф слабовсхолмленный с перепадом абсолютных высот от 60 до 82 м над ур. м. Леса надпойменной террасы представлены сложной мозаикой сосняков брусничного и мохово-лишайникового типов разного возраста: от молодняков на гарях и вырубках до небольших участков старовозрастных лесов. Болота преимущественно вахтово-сабельниково-сфагновые или осоково-пушицево-сфагновые. Среди болот встречаются сосновые боры на минеральных островах, переувлажненные участки елово-сосновых лесов вахтово-сфагнового и осоково-сфагнового типов и березовые редколесья на кромках осоково-вахтово-сфагновых болот.

Исследование выполнено в первой половине зимы с 14.11.2023 по 27.12.2023 г. В этот период на участке исследований функционировали 3 ошейника “Квазар” (ООО “ЭС-ПАС”, Россия), установленных на диких северных оленях (*Rangifer tarandus* (Linnaeus 1758)). Позиционирование осуществляется с использованием глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС каждые 10 минут, передача сообщений – каждые 2.5 минуты. Каждая определенная позиция передается в виде кодированных сообщений трижды: сразу после привязки, через 62.5 минуты и через 125 минут. Это повышает шансы на получение сообщения о местоположении животного. В четвертом сообщении в течение 10-минутного цикла передается закодированная информация о поведении животного. Поведение определяется нейросетью на основе информации, поступающей от датчиков движения. В данном исследовании анализируется влияние внешних факторов на общее количество полученных сообщений, вне зависимости от закодированной в них информации.

Для приема сообщений в районе исследований используется девять космических аппаратов спутниковой группировки Argos:

- A1 – инновационный французский микро-спутник-демонстратор ANGELS;
- CS – современный малый инновационный американский спутник GAZELLE;
- MB (METOP-B), MC (METOP-C) – европейские метеорологические спутники METOP;
- NK (NOAA-15), NN (NOAA-18), NP (NOAA-19) – американские метеорологические спутники NOAA;
- O3 – индийский океанографический спутник OCEANSAT-3;
- SR – индийский альтиметрический спутник SARAL.

Траектории всех спутников на каждом витке вокруг земного шара смещаются в меридиональном направлении, в результате чего изменяется продолжительность нахождения спутника над горизонтом относительно неподвижного наблюдателя, максимальная высота его подъема над линией горизонта, азимут на наиболее высокую часть траектории. На 61.7° с.ш. каждый спутник в течение примерно 7–8.5 часов в сутки не появляется над линией горизонта, обычно эти периоды приходятся на темное время суток. Спутник CS не появляется над горизонтом в среднем в период с 16:09 до 00:12 UTM, MB – с 20:26 до 04:20 UTM, MC – с 20:33 до 04:19 UTM, NK – с 18:27 до 02:19 UTM, NN – с 21:41 до 05:23 UTM, NP – с 19:35 до 03:46 UTM, O3 – с 22:55 до 07:05 UTM. Только два спутника в ночные часы продолжают пролетать над исследуемым участком. Они уходят за горизонт в среднем в период A1 – с 04:16 до 13:30 UTM, SR – с 04:51 до 12:49 UTM. Все эти особенности траекторий обуславливают неравномерность интенсивности пролета спутников над районом исследований, что оказывает влияние на успешность получения сообщений, передаваемых ошейником. В данном исследовании выполнен анализ влияния количества спутников, появляющихся над горизонтом в течение часа, максимальной высоты их траектории (в градусах над линией горизонта), азимута на наиболее высокую часть траектории спутника, а также типа спутника на результативность передачи данных. Кроме того, учитывая, что спутники, имеющие максимальный угол подъема над горизонтом менее 10°, принимают гораздо меньше сообщений, дополнительно была изучена зависимость количества сообщений, принятых в течение часа, от количества спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом более 10°, в течение того же периода времени.

Среди природных факторов, влияющих на получение пользователем сообщений, рассматриваются: облачность, осадки, сомкнутость крон деревьев в месте нахождения животного в момент успешной

передачи сообщения и наличие снега на ветвях в кронах деревьев (кухты). Сведения о погодных условиях получены из архива метеостанции “Красноборск” Росгидромета, расположенной на расстоянии около 20 км на ЮЮВ от района исследований (Архив погоды в Красноборске (gr5.ru)). В соответствии с количеством облаков выделено 3 категории фактора: ясно (облака покрывают не более 20% неба), облачно (облака покрывают от 20 до 80% неба), пасмурно (облака покрывают более 80% неба). Осадки также разделены на три категории: осадков нет, слабые осадки (до 1 мм в течение 3 часов) и сильные осадки (более 1 мм в течение 3 часов). Сведения о наличии снега на ветвях деревьев получены с использованием автономных фоторегистраторов (фотоловушек) Seelock S308, установленных на исследуемом участке. Выделено 3 категории наличия кухты: полное отсутствие снега на ветвях деревьев; тонкий слой снега на ветвях и хвое сосен и плотные шапки снега в кронах. Сомкнутость крон на участке исследования определена на основе анализа спутниковых снимков земной поверхности высокого разрешения, находящихся в свободном доступе в сети Internet (<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/14/61.6971/45.7038>). Сомкнутость крон также оценивалась в трех категориях: открытые пространства (без древостоя или с разреженным древостоем с сомкнутостью крон менее 10%); разреженные леса (участки с сомкнутостью крон от 10 до 30%); плотные хвойные леса (участки с сомкнутостью крон выше 30%). Для каждой полученной позиции с использованием программного обеспечения QGIS3.28.2 определена категория сомкнутости, в которой находился зверь в момент передачи сообщения.

Всего за исследуемый период получено 8139 сообщений, от 0 до 5 сообщений за один пролет спутника, от 0 до 14 сообщений в течение часа. Статистическая обработка данных выполнена в Statgraphics Centurion 19 – X64. Выборки, характеризующие количество полученных сообщений в единицу времени или за один пролет спутника, соответствуют распределению Пуассона. Соответственно, при анализе данных были построены обобщенные линейные модели регрессии Пуассона. При анализе данных использованы два варианта моделей: первый вариант создан на основе количества сообщений, полученных за один пролет спутника над исследуемой территорией; второй – на основе количества сообщений, принятых в течение часа. В каждом варианте была выбрана лучшая модель на основе информационного критерия Akaike.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В среднем период обращения спутников, используемых для получения сообщений, составляет

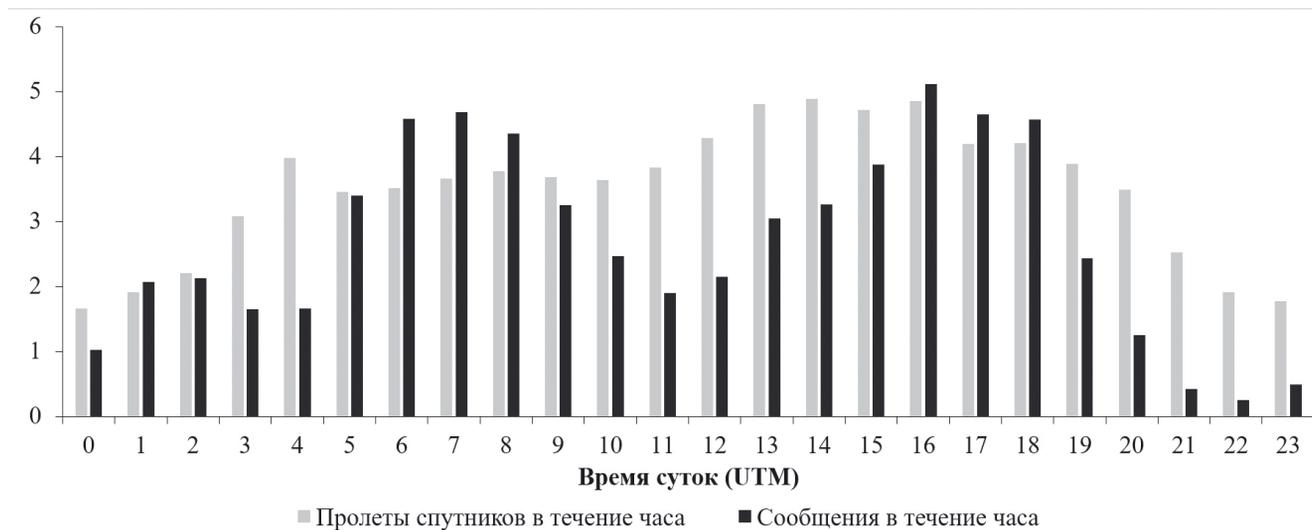


Рис. 1. Среднее количество спутников, поднимающихся над линией горизонта, и среднее количество сообщений, принятых в течение одного часа.

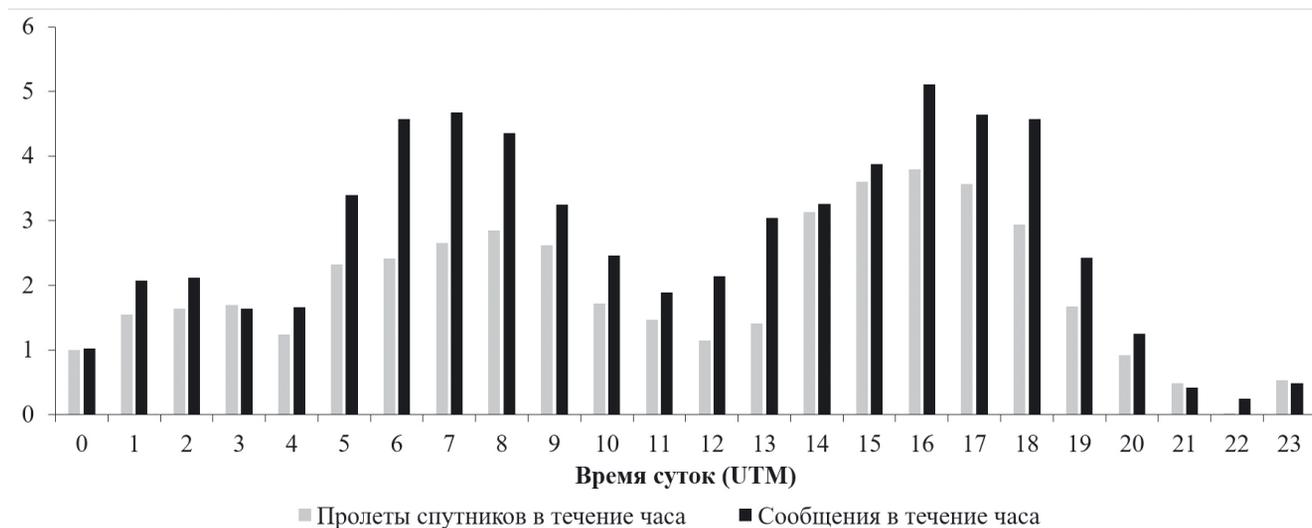


Рис. 2. Среднее количество спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом более 10° , и среднее количество сообщений, принятых в течение часа.

около 90 минут. Для каждого аппарата характерны периоды, когда он не поднимается над линией горизонта. Для широты $N61.7$ они могут быть продолжительностью около 6 часов 50 минут или 8 часов 30 минут. Таким образом, на исследуемой территории каждый из девяти космических аппаратов спутниковой группировки Argos появляется над линией горизонта 10–11 раз в течение суток. В связи с тем, что траектории движения спутников построены таким образом, чтобы как можно реже уходить в тень Земли, интенсивность пролетов спутников в темное время суток (с 21:00 до 03:00

UTM) значительно снижается. Сокращается и количество принятых сообщений, передаваемых ошейником, но динамика поступления сообщений не соответствует изменениям интенсивности пролета спутников (рис. 1). В темное время суток, кроме интенсивности пролета, также снижается количество спутников с высотой траектории более 10° над линией горизонта (с 19:00 до 05:00 UTM). Второй период с малым количеством спутников, достаточно высоко поднимающихся над линией горизонта, существует около полудня по местному времени (с 10:00 до 14:00 UTM) (рис. 2). Анализ

количества сообщений, принятых спутниками с разной высотой траектории, показал, что лишь около 7% спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом менее 10° , принимают хотя бы одно сообщение, переданное ошейником.

Из числа спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом от 10° до 20° , сообщения принимают уже 28.8% аппаратов. Поэтому в качестве одного из факторов, оказывающих влияние на успешность приема сообщений, принят показатель количества спутников, которые в течение часа имеют максимальный угол подъема над горизонтом более 10° .

Для анализа влияния высоты траектории и модели космического аппарата на успешность приема сообщений, передаваемых ошейником, была построена обобщенная линейная модель регрессии Пуассона на основе данных о распределении количества сообщений, полученных за один пролет спутника. В анализ включены следующие факторы: высота траектории спутника над горизонтом, азимут на наивысшую точку траектории спутника, модель спутника, облачность, наличие осадков, сомкнутость крон деревьев и наличие кусты. Количество сообщений оценивалось индивидуально для каждого ошейника, так как передающие устройства при одном и том же пролете спутника могли находиться в разных типах местообитаний, отнесенных к разным категориям сомкнутости крон. Всего в анализ включено 11 708 пролетов девяти спутников. Во время 4772 пролетов спутники приняли от 1 до 5 сообщений. Всего принято 8139 сообщений. На основе информационного критерия Akaike выбрана модель, включающая 5 факторов: высоту траектории, модель спутника, облачность, сомкнутость крон и наличие кусты.

Уравнение данной модели регрессии Пуассона имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{Messages} = & \exp(-1.16565 + 0.0263175 * \text{Elevation} - \\ & - 0.987241 * \text{Satellite} = A1 - 0.0634976 * \text{Satellite} = \\ & = \text{CS} - 0.663935 * \text{Satellite} = \text{MB} + \\ & + 0.183478 * \text{Satellite} = \text{MC} - 0.0859905 * \text{Satellite} = \\ & = \text{NK} + 0.0199425 * \text{Satellite} = \text{NN} + \\ & + 0.0915314 * \text{Satellite} = \text{NP} - 0.0720475 * \text{Satellite} = \\ = & O3 + 0.0841316 * \text{Clouds} = 0 + 0.0715824 * \text{Clouds} = \\ = & 1 + 0.914725 * \text{Canopy} = 0 + 0.238105 * \text{Canopy} = \\ & 1 - 0.223522 * \text{Kuhta} = 0 - 0.0697705 * \text{Kuhta} = 1), \end{aligned}$$

где Messages – количество сообщений, принятых за один пролет спутника;

Elevation – высота наивысшей точки траектории спутника, в градусах над горизонтом;

Satellite = A1, Satellite = CS, Satellite = MB и т.д. – модели спутников;

Clouds = 0 – ясно (облачность менее 20%);

Clouds = 1 – облачно (облачность 20–80%);

Canopy = 0 – открытые пространства (сомкнутость крон не более 10%);

Canopy = 1 – разреженные леса (сомкнутость крон от 10 до 30%);

Kuhta = 0 – отсутствие снега на ветвях деревьев;

Kuhta = 1 – тонкий слой снега на ветвях деревьев.

Примечания. В данной модели за стандартные условия приняты: пасмурное небо, высокая сомкнутость крон (более 30%), обильная кучта (плотные шапки снега на кронах). Отклонения в приеме сообщений разными моделями спутников указаны в сравнении с успешностью приема индийским альтиметрическим спутником SARAL (SR).

Данная модель объясняет 31.2% варьирования количества сообщений, принятых за один пролет спутника. Благодаря равнинному характеру местности азимут наивысшей точки траектории спутника не оказывал существенного воздействия на количество принятых сообщений. Наличие осадков во время передачи сообщений также не оказало заметного воздействия на количество принятых сообщений. Наибольшее влияние на успешность приема сообщений оказывает высота траектории спутника. При увеличении высоты траектории успешность приема экспоненциально возрастает. Из природных факторов наибольшее влияние оказывает тип местообитаний, в котором в момент передачи сообщения находится животное. Наилучший прием наблюдался при передаче с открытых участков. При нахождении животного в плотных насаждениях с высокой сомкнутостью крон успешность приема сообщений заметно снижается (рис. 3). Влияние облачности заметно слабее. Лишь плотная облачность оказывает отрицательное влияние на успешность приема сообщений (рис. 4). Наличие снега на ветвях в кронах деревьев оказывает положительное влияние на успешность приема сообщений спутниками, особенно при его высоком обилии (рис. 5). Успешность приема сообщений также сильно зависит от модели спутника, находящегося в зоне видимости в момент передачи сообщения ошейником. Наибольший пропуск сообщений характерен для инновационного французского микроспутника-демонстратора ANGELS (A1) и европейского метеорологического спутника METOP-B (MB). Наилучший прием обеспечивают европейский метеорологический спутник METOP-C (MC), а также американские метеорологические спутники NOAA-18 (NN) и NOAA-19 (NP) (рис. 6).

Вторая модель рассматривает влияние интенсивности пролета спутников и природных факторов на количество полученных сообщений. В течение часа количество спутников над горизонтом варьировало от 0 до 9, количество спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом более 10° , – от 0 до 8, количество принятых

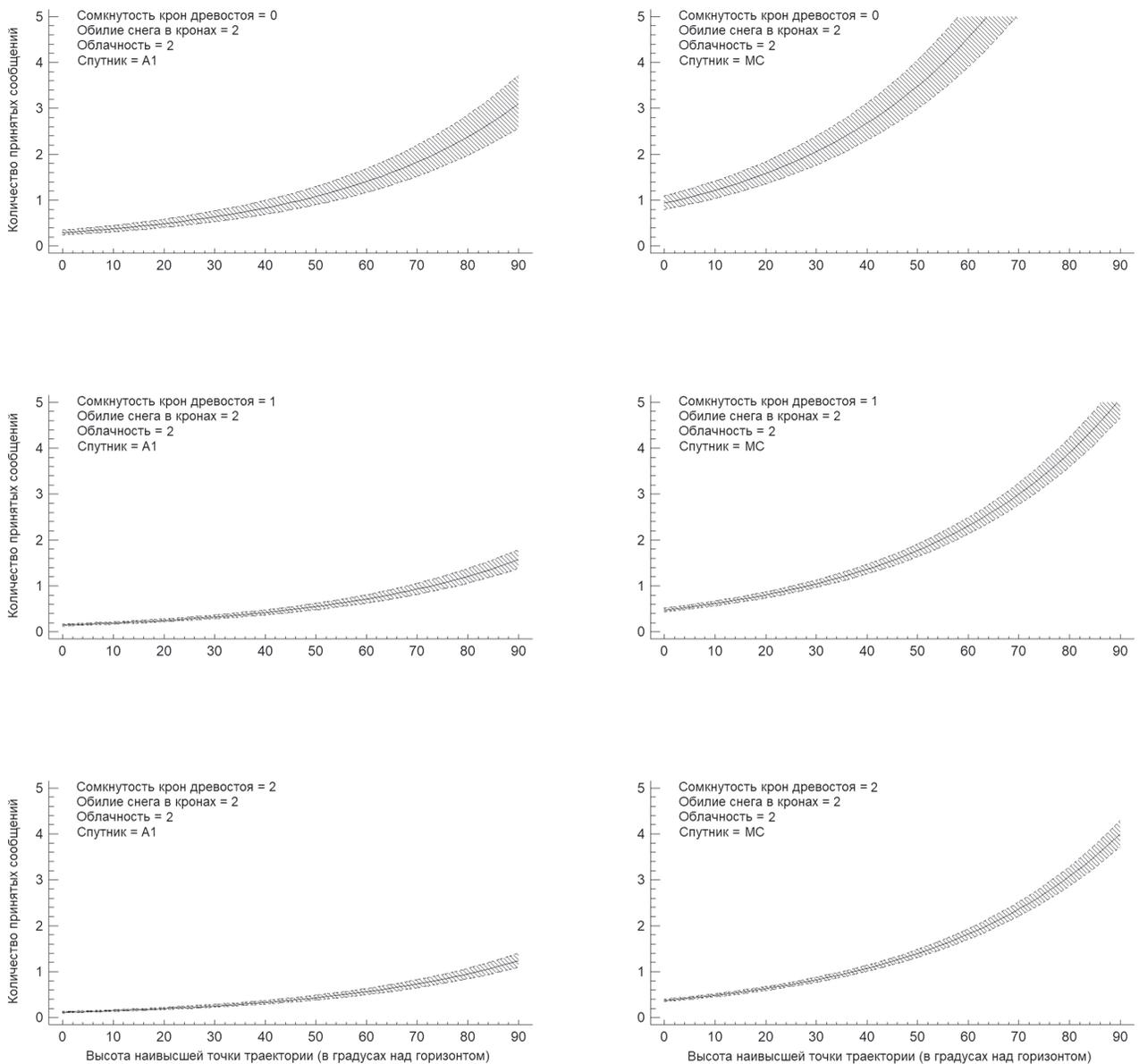


Рис. 3. Влияние сомкнутости крон на успешность приема сообщений спутниками с минимальным (A1) и максимальным (MC) количеством принятых сообщений при прочих условиях, принятых за стандартные.

Классификация факторов и их обозначения в приведенной выше формуле модели (в скобках):

По оси x – высота наивысшей точки траектории спутника (в градусах над горизонтом) (Elevation); по оси y – (Messages) – количество сообщений (Messages), принятых за один пролет спутника. Факторы: сомкнутость крон древостоя = 0 (Canopy = 0) – открытые пространства (сомкнутость крон не более 10%); сомкнутость крон древостоя = 1 (Canopy = 1) – разреженные леса (сомкнутость крон от 10 до 30%); сомкнутость крон древостоя = 2 (Canopy = 2) – плотные леса (сомкнутость крон более 30%); обилие снега в кронах = 0 (Kuhta = 0) – отсутствие снега на ветвях деревьев; обилие снега в кронах = 1 (Kuhta = 1) – тонкий слой снега на ветвях деревьев; обилие снега в кронах = 2 (Kuhta = 2) – плотные шапки снега на ветвях деревьев; облачность = 0 (Clouds = 0) – ясно (облачность менее 20%); облачность = 1 (Clouds = 1) – облачно (облачность 20–80%); облачность = 2 (Clouds = 2) – пасмурно (облачность более 80%); Спутник = A1 (Satellite = A1), Спутник = MC (Satellite = MC) – модели спутников (см. описание в разделе “Материал и методики”).

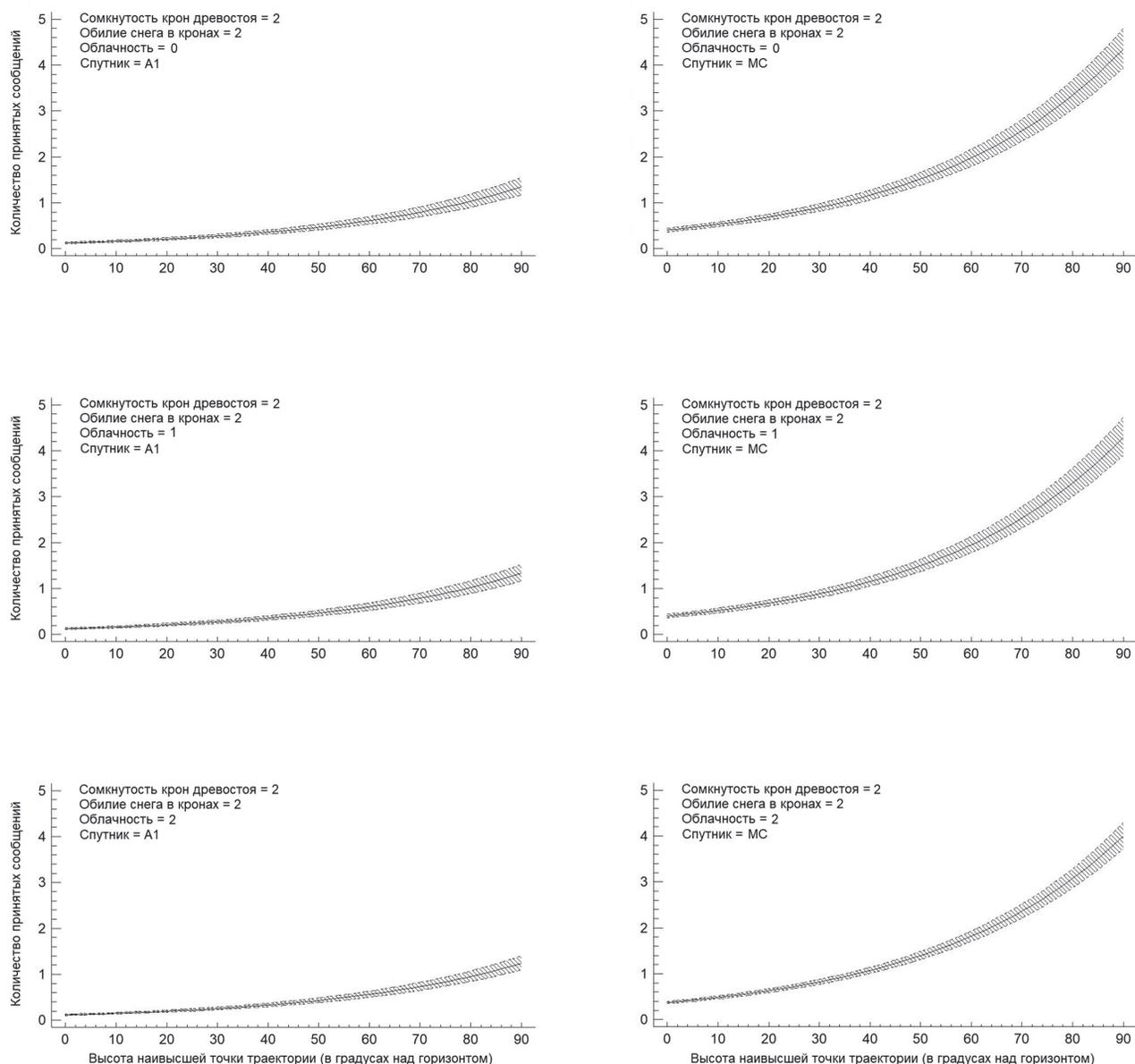


Рис. 4. Влияние облачности на успешность приема сообщений спутниками с минимальным (А1) и максимальным (МС) количеством принятых сообщений при прочих условиях, принятых за стандартные. Классификация факторов соответствует подписи к рис. 3.

сообщений – от 0 до 14. На основе информационного критерия Акаике выбрана модель, включающая 4 фактора: количество спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом более 10°; облачность; сомкнутость крон и наличие кучты.

Уравнение данной модели регрессии Пуассона имеет следующий вид:

$$\text{Messages} = \exp(-0.0295914 + 0.309619 * \text{Satellite} > 10 + 0.0823792 * \text{Clouds} = 0 + 0.135578 * \text{Clouds} = 1 + 0.871145 * \text{Canopy} = 0 +$$

$$+ 0.197295 * \text{Canopy} = 1 - 0.203318 * \text{Kuhta} = 0 - 0.0921113 * \text{Kuhta} = 1),$$

где $\text{Satellite} > 10$ – количество спутников, которые в течение часа имеют максимальный угол подъема над горизонтом более 10°.

Остальные обозначения соответствуют обозначениям в уравнении предыдущей модели.

Данная модель объясняет 31.2% варьирования количества сообщений, принятых в течение одного

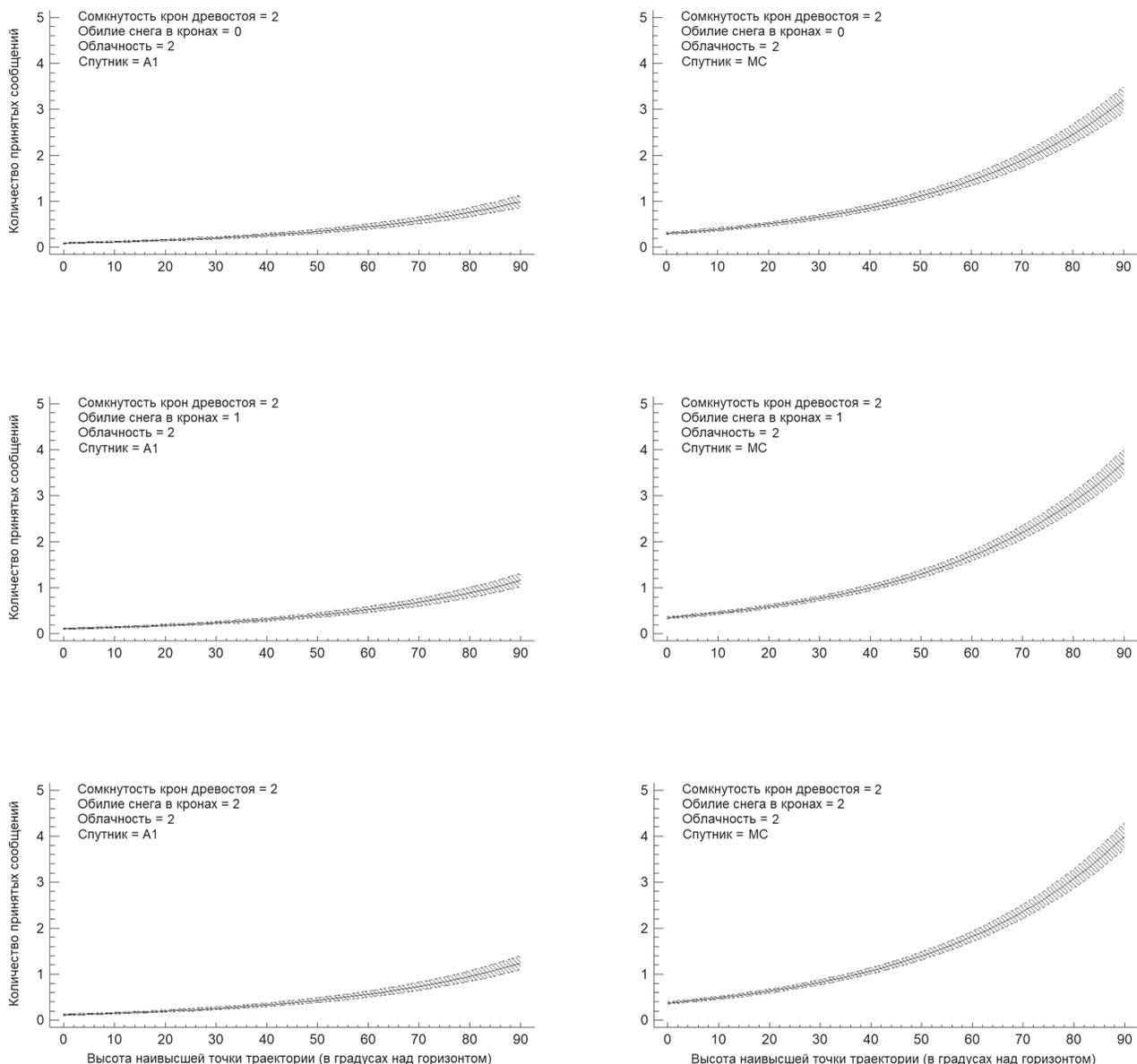


Рис. 5. Влияние кучты на успешность приема сообщений спутниками с минимальным (А1) и максимальным (МС) количеством принятых сообщений при прочих условиях, принятых за стандартные. Классификация факторов соответствует подписи к рис. 3.

часа. Количество принятых в течение часа сообщений экспоненциально растет по мере увеличения количества спутников, поднимающихся выше 10° над горизонтом. Общее количество спутников, появляющихся над горизонтом в течение часа, оказывает меньшее влияние на успешность приема сообщений. Модель с общим количеством спутников в течение часа и природными факторами, аналогичными рассматриваемой модели, объясняет лишь 23.2% отклонений в количестве сообщений в течение часа. В рассматриваемой модели влияние

природных факторов аналогично рассмотренному выше, при анализе модели с количеством сообщений, полученных спутником за один пролет (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа демонстрируют высокую степень зависимости успешности приема сообщений от высоты траектории спутников, а также от интенсивности их появления выше 10° над линией горизонта. Анализ траекторий орбит

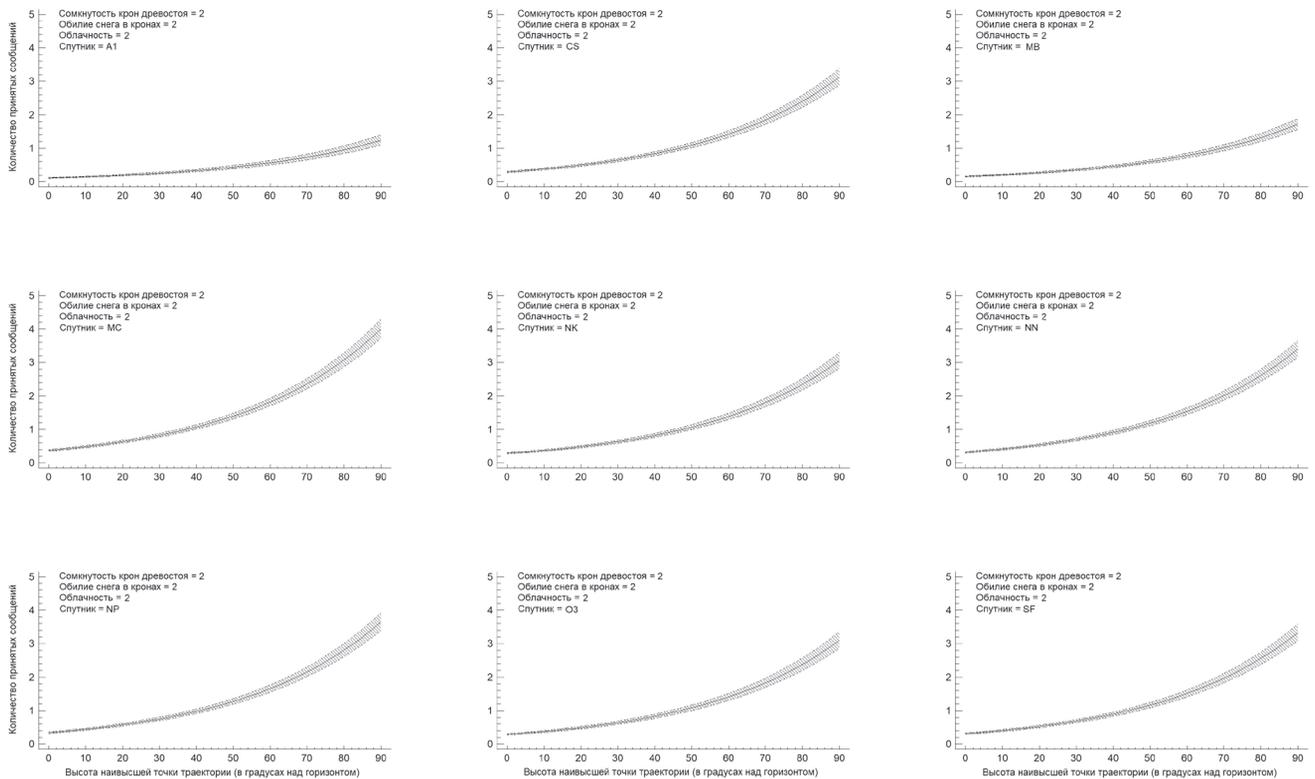


Рис. 6. Различия успешности приема сообщений разными моделями спутников при прочих условиях, принятых за стандартные. Классификация факторов соответствует подписи к рис. 3.

спутников показал, что наблюдается высокая неравномерность интенсивности пролета спутников над линией горизонта на высоте, достаточной для уверенного приема сообщений. Наибольшее влияние эти факторы оказывают на успешность приема сообщений в период с 20:00 до 01:00 UTM, когда в течение часа на высоту более 10° над линией горизонта поднимаются от 0 до 3 спутников. При этом в этот период в течение часа три спутника имеют максимальный угол подъема над горизонтом выше 10° лишь в 2% случаев, а в 26% случаев спутники на данной высоте не наблюдаются. Следует также заметить, что 25% пролетов в этот период приходятся на инновационный французский микроспутник-демонстратор ANGELS (A1), эффективность приема сообщений которым минимальна. Поэтому, несмотря на то, что ошейник регулярно передает по 24 сообщения в течение часа, в указанный период в течение часа в среднем получено 0.74 ± 0.05 сообщений с одного действующего ошейника, то есть около 3.1% от количества переданных. Периоды наилучшего приема сообщений приходятся на временные промежутки с 05:00 до 10:00 и с 16:00 до 19:00 UTM. В указанные периоды только в 3.4% случаев в течение часа

над горизонтом поднимался только один спутник, имеющий максимальный угол подъема более 10° , а в 57.3% случаев таких спутников наблюдалось от 4 до 8. В результате для этих временных промежутков характерна высокая успешность приема сообщений. В среднем в течение часа принято 4.51 ± 0.10 сообщений, около 18.8% от количества переданных ошейниками.

Неравномерность получения сообщений может усугубляться природными факторами, также оказывающими воздействие на успешность приема данных. Плотная облачность может оказывать небольшое негативное влияние на количество сообщений, принятых спутниками. Гораздо большее влияние оказывает сомкнутость крон деревьев, в результате чего в периоды, когда животное находится под пологом плотного леса, успешность приема сообщений снижается. Вероятно, это связано с тем, что ветви деревьев создают своеобразную экранирующую сетку, препятствующую прохождению сигнала. Это подтверждается положительным влиянием обильного снега, налипшего на ветви в кронах деревьев (кухты). В этом случае ветви объединяются снегом в единую, незначительно

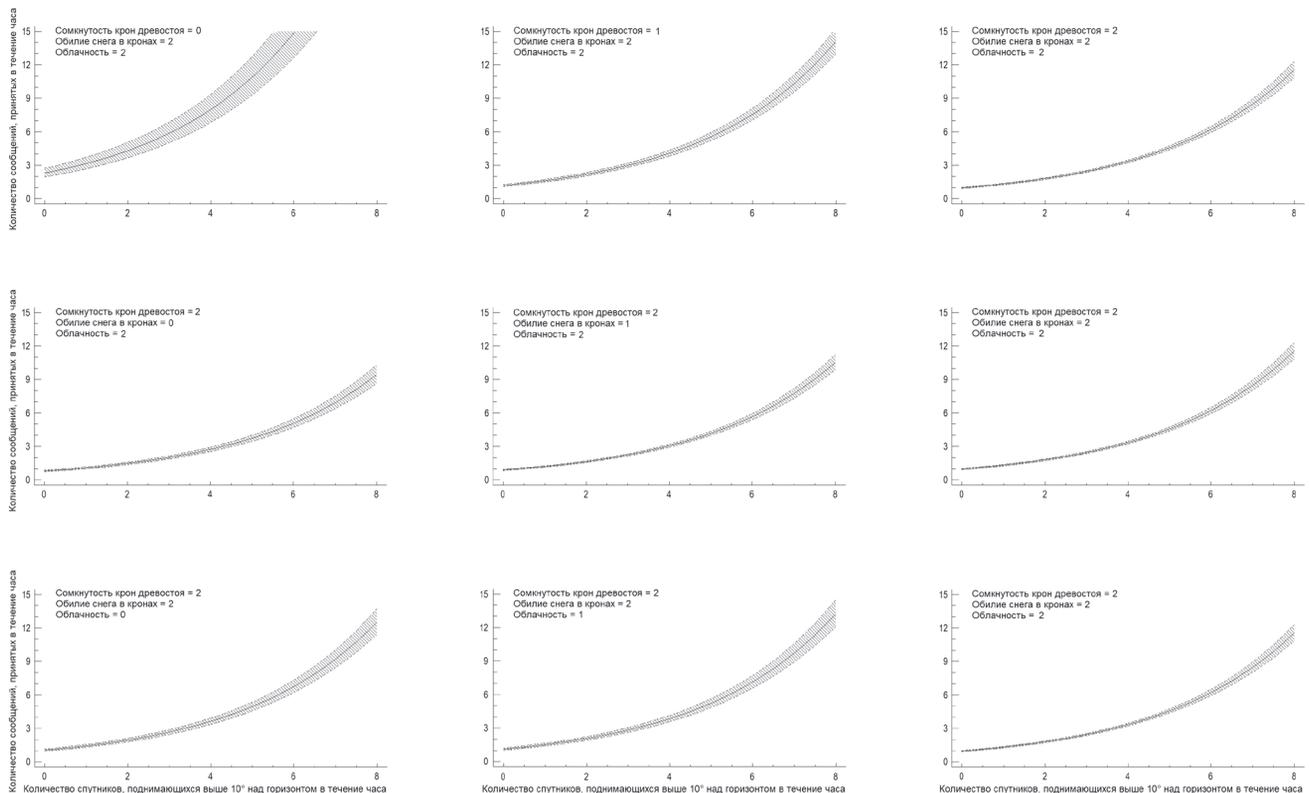


Рис. 7. Влияние природных факторов на количество сообщений, принятых в течение часа, на фоне изменения интенсивности пролета спутников, поднимающихся выше 10° над горизонтом в тот же период.

Классификация факторов и их обозначения в приведенной выше формуле модели (в скобках).

По оси x – количество спутников, имеющих максимальный угол подъема над горизонтом более 10° , в течение часа (Satellite > 10); по оси y – количество сообщений, принятых в течение часа (Messages). Факторы: сомкнутость крон древостоя = 0 (Сапору = 0) – открытые пространства (сомкнутость крон не более 10%); сомкнутость крон древостоя = 1 (Сапору = 1) – разреженные леса (сомкнутость крон от 10 до 30%); сомкнутость крон древостоя = 2 (Сапору = 2) – плотные леса (сомкнутость крон более 30%); обилие снега в кронах = 0 (Kuhta = 0) – отсутствие снега на ветвях деревьев; обилие снега в кронах = 1 (Kuhta = 1) – тонкий слой снега на ветвях деревьев; обилие снега в кронах = 2 (Kuhta = 2) – плотные шапки снега на ветвях деревьев; облачность = 0 (Clouds = 0) – ясно (облачность менее 20%); облачность = 1 (Clouds = 1) – облачно (облачность 20–80%); облачность = 2 (Clouds = 2) – пасмурно (облачность более 80%).

разобщенную массу, которая теряет свойства экраннующего воздействия сетки.

В результате воздействия рассмотренных факторов возникает высокая неравномерность полученных пространственных данных, которую надо учитывать при планировании эксперимента и в процессе анализа полученных данных. Рассмотренные нами модели объясняют лишь около 30% изменчивости успешности приема сообщений спутниками. Вероятно, большее влияние оказывает поведение самого животного, от которого зависит положение передающего устройства в пространстве. В определенные моменты времени, особенно, когда животное лежит, передающая антенна ошейника может оказаться перекрытой телом животного, прикрыта плотной сеткой ветвей расположенного рядом

подлеска. Такого рода факторы можно учесть только при высоком уровне знаний особенностей экологии, этологии и циркадной активности исследуемого вида животных.

Проблема неравномерности поступления сообщений на спутники системы “Argos” известна давно. Многие производители спутниковых радиомаяков, функционирующих в составе этой системы, учитывают эту проблему и стараются нивелировать ее путем многократного излучения одних и тех же сообщений, повышая тем самым вероятность их получения спутниками. Радиомаяки “Квазар” не просто повторно излучают сообщения, а делают это со значительными временными промежутками, “пережидая” возможные паузы в спутниковых пролетах. В результате позиция животного,

определенная в период низкой интенсивности пролетов, может быть передана на спутник позднее, когда обстановка будет более благоприятна.

При этом производителю оборудования приходится искать компромисс между количеством повторений каждого сообщения и продолжительностью функционирования радиомаяка (так как на излучение каждого сообщения расходуется электроэнергия), а также компромисс между периодичностью повторения сообщений (чем больше период, тем выше вероятность дождаться окончания периода низкой интенсивности пролетов) и актуальностью поступающей информации.

В связи с этим стратегия функционирования ошейника спутниковой системы “Argos” должна выбираться с учетом целого ряда факторов, основными среди которых являются:

- географическая широта, на которой планируется выполнять проект;
- особенности окружающей местности (расположенность, рельеф);
- желаемая продолжительность функционирования радиомаяка;
- решаемые задачи (оперативные, требующие быстрого реагирования, или же фундаментальные).

ВЫВОДЫ

В результате высокой изменчивости успешности приема сообщений, переданных ошейниками, возникает неравномерность плотности пространственных данных, полученных в течение суток. Некоторые отрезки траектории животного, которые могут приходиться на периоды его низкой активности, могут иметь многократно большее количество полученных позиций, чем участки в ночные часы, когда некоторые виды животных более активны. Такие данные в необработанном виде не пригодны для использования в анализе предпочтений животного в выборе местообитаний. Стандартизация пространственных данных, предусматривающая удаление большинства точек траектории движения животного для создания временной равномерности позиций (De Groeve et al., 2020; Lombardi et al., 2021; Oeser, 2022), должна строиться на основе хороших знаний экологии, этологии и циркадной активности изучаемого вида. При этом необходимо учитывать, что в разные сезоны поведение и активность пространственных перемещений животных существенно различаются, а циркадная активность в значительной степени зависит от периодичности солнечной (а для многих видов и лунной) освещенности. В высоких широтах суточная периодичность освещенности может изменяться в течение рассматриваемого сезона, поэтому в процессе

стандартизации данных необходимо учитывать эти особенности района исследований.

Результаты исследований, построенных на анализе данных телеметрии перемещений животных, имеют высокую зависимость от успешности получения этих данных. Целесообразно еще на этапе планирования полевой части исследования определить конкретные цели получения пространственных данных, представлять возникающие сложности их обработки и анализа. Необходимо предусмотреть различия в интенсивности определения позиций и передачи сообщений в соответствии с целями исследования и особенностями приема сообщений в данной местности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Статья подготовлена в рамках выполнения темы государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН “Научные основы и социокультурные факторы сохранения и использования потенциала биологического разнообразия на Европейском Севере и в Арктике” (регистрационный номер – 122011400382-8). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Соответствие исследования международным этическим стандартам подтверждено Этическим комитетом ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук по биоэтике.

“Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены”. (выписка из протокола заседания Этического комитета – Заключение № 003-25/07 от 25 июля 2024 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы Сальман А.Л. является руководителем компании-производителя оборудования, которое было использовано в данном исследовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Amstrup S.C., McDonald T.L., Durner G.M.*, 2004. Using satellite radiotelemetry data to delineate and manage wildlife populations // *Wildlife Society Bulletin*. V. 32. № 3. P. 661–679.
[https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2004\)032\[0661:USRDTD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[0661:USRDTD]2.0.CO;2)
- Cagnacci F., Boitani L., Powell R.A., Boyce M.S.*, 2010. Animal ecology meets GPS-based radiotelemetry: a perfect storm of opportunities and

- challenges // *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biol. Sci.* V. 365. № 1550. P. 2157–2162. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0107>
- Coxen Ch.L., Frey J.K., Carleton S.A., Collins D.P., 2017. Species distribution models for a migratory bird based on citizen science and satellite tracking data // *Global Ecology and Conservation*. V. 11. P. 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.08.001>
- Csermak-Jr A.C., de Araujo G.R., Pizzutto C.S., de Deco-Souza T., Jorge-Neto P.N., 2022. GPS collars as a tool to uncover environmental crimes in Brazil: The jaguar as a sentinel // *Animal Conservation*. V. 26. № 2. P. 137–275. <https://doi.org/10.1111/acv.12826>
- De Groeve J., Cagnacci F., Ranc N., Bonnot N.C., Gehr B., Heurich M., Hewison A.J.M., Kroeschel M., Linnell J.D., Morellet N., Mysterud A., Sandfort R., Van De Weghe N., 2020. Individual movement-sequence analysis method (IM-SAM): characterizing spatio-temporal patterns of animal habitat use across landscapes // *International Journal of Geographical Information Science*. V. 34. P. 1530–1551. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1594822>
- DeCesare N.J., Squires J.R., Kolbe J.A., 2005. Effect of forest canopy on GPS-based movement data // *Wildlife Society Bulletin*. V. 33. № 3. P. 935–941. [https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2005\)33\[935:EOFCOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2005)33[935:EOFCOG]2.0.CO;2)
- Fernandez-Rodriguez P., Carrasco R., Moro J., Garrido-Carretero M.S., Azorit C., 2023. Working with GNSS collar data. The importance of pre-analysis when setting the sampling interval // *Ecological Informatics*. V. 77. Ar. 102219. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102219>
- Forin-Wiart M.-A., Hubert P., Sirguy P., Poulle M.-L., 2015. Performance and accuracy of lightweight and low-cost GPS data loggers according to antenna positions, fix intervals, habitats and animal movements // *PLoS One*. V. 10. № 6. Ar. 0129271. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129271>
- Frair J.L., Fieberg J., Hebblewhite M., Cagnacci F., DeCesare N.J., Pedrotti L., 2010. Resolving issues of imprecise and habitat-biased locations in ecological analyses using GPS telemetry data // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. V. 365. № 1550. P. 2187–2200. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0084>
- Garcia-Jimenez R., Margalida A., Perez-Garcia J.M., 2020. Influence of individual biological traits on GPS fix-loss errors in wild bird tracking // *Scientific Reports*. V. 10. Ar. 19621. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76455-x>
- Hebblewhite M., Haydon D.T., 2010. Distinguishing technology from biology: A critical review of the use of GPS telemetry data in ecology // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. V. 365. № 1550. P. 2303–2312. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0087>
- Leonard J.P., Tewes M.E., Lombardi J.V., Wester D.W., Campbell T.A., 2020. Effects of sun angle, lunar illumination, and diurnal temperature on temporal movement rates of sympatric ocelots and bobcats in South Texas // *PLoS ONE*. V. 15. № 4. Ar. e0231732. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231732>
- Lombardi J.V., Perotto-Baldivieso H.L., Hewitt D.G., Scognamiglio D.G., Campbell T.A., Tewes M.E., 2022. Assessment of appropriate species-specific time intervals to integrate GPS telemetry data in ecological niche models // *Ecological Informatics*. V. 70. Ar. 101701. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101701>
- Lombardi J.V., Perotto-Baldivieso H.L., Sergeev M., Veals A.M., Schofield L., Young J.H., Tewes M.E., 2021. Landscape structure of woody cover patches for endangered ocelots in southern Texas // *Remote Sensing*. V. 13. № 19. Ar. 4001. <https://doi.org/10.3390/rs13194001>
- Oeser J., 2022. Leveraging big satellite image and animal tracking data for characterizing large mammal habitats. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum naturalium. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin – Geographisches Institut. 179 p.
- Sager-Fradkin K.A., Jenkins K.J., Hoffman R.A., Happe P.J., Beecham J.J., Wright R.G., 2007. Fix Success and Accuracy of Global Positioning System Collars in Old-Growth Temperate Coniferous Forests // *Journal of Wildlife Management*. V. 71. № 4. P. 1298–1308. <https://doi.org/10.2193/2006-367>
- Street G.M., Potts J.R., Börger L., Beasley J.C., Demarais S., Fryxell J.M., McLoughlin P.D., Monteith K.L., Prokopenko C.M., Ribeiro M.C., Rodgers A.R., Strickland B.K., Van Beest F.M., Bernasconi D.A., Beumer L.T., Dharmarajan G., Dwinnell S.P., Keiter D.A., Keuroghlian A., Newediuk L.J., Oshima J.E.F., Rhodes Jr. O., Schlichting P.E., Schmidt N.M., Wal E.V., 2021. Solving the sample size problem for resource selection functions // *Methods in Ecology and Evolution*. V. 12. № 12. P. 2421–2431. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13701>
- Walton Z., Samelius G., Odden M., Willebrand T., 2018. Long-distance dispersal in red foxes *Vulpes vulpes* revealed by GPS tracking // *European Journal of Wildlife Research*. V. 64. Ar. 64. <https://doi.org/10.1007/s10344-018-1223-9>
- Webb S.L., Dzialak M.R., Mudd J.P., Winstead J.B., 2013. Developing spatially-explicit weighting factors to account for bias associated with missed GPS fixes in resource selection studies // *Wildlife Biology*. V. 19. № 3. P. 257–273. <https://doi.org/10.2981/12-038>

INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE SUCCESS OF TRANSMISSING MESSAGES DURING THE MONITORING OF WILD REINDEER MOVEMENTS USING THE “ARGOS” SATELLITE SYSTEM (*RANGIFER TARANDUS*)

V. N. Mamontov^{1,*}, A. L. Salman^{2,**}

¹ *N. P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 163020 Russia*

² *“ES-PAS”, Moscow, 125171 Russia*

**e-mail: mamont1965@list.ru*

***e-mail: a.salman@es-pas.com*

Currently, satellite telemetry is increasingly in use in environmental research. As a result, researchers obtain a large amount of data on the use of space by animals. However, despite the perfection of modern satellite navigation and data transmission systems, reports on the positions of animals are extremely uneven. We consider here the main technical and natural factors that may influence the success of spacecraft in the “Argos” satellite system receiving messages emitted by radio beacons installed on animals. Among the natural factors when an animal is under the forest canopy, the greatest influence has been established to be exerted by the closure of tree crowns, which can be offset by the abundance of snow in the crowns after heavy snowfalls. Dense clouds have a weaker effect. Of the technical factors associated with the characteristics of flights of satellites of the “Argos” system, the success of receiving messages is influenced, first of all, by the maximum angle of elevation of the satellite above the horizon and the intensity of flights of satellites with a maximum angle of elevation above the horizon of more than 10° per unit time. This is due to the high unevenness of message receipt. At night and in the afternoon, due to a reduction in the number of satellite flights and a decrease in the altitude of their trajectories, the success of reception may decrease to 3% of the number of transmitted messages.

Keywords: satellite telemetry, “Argos” satellite system, animal movements, reception of messages by satellites