АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2021, том 55, № 6, с. 522–541

УДК 523

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТ ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ЛУНА-25

© 2021 г. М. В. Дьячкова[a, *], И. Г. Митрофанов[a], А. Б. Санин[a], М. Л. Литвак[a, **], В. И. Третьяков[a, *]**

[a] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

**e-mail: djachkova@np.cosmos.ru*

***e-mail: mlitvak.iki@gmail.com*

****e-mail: vladtr@mx.iki.rssi.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2021 г.
После доработки 20.07.2021 г.
Принята к публикации 22.07.2021 г.

Данная статья посвящена характеристике выбранных основного и резервного районов посадки для космического аппарата Луна-25. На основе имеющихся цифровых моделей рельефа с различным пространственным разрешением, достигающим для основного района посадки значений в 2 м и сравнимым с размерами космического аппарата, были созданы инженерные модели территории районов посадки. Созданные инженерные модели включают в себя сведения о рельефе – высотах поверхности и вычисленных на их основе морфометрических параметрах. Также были подробно рассмотрены условия освещенности Солнцем и радиовидимости для районов посадки за период предполагаемой работы космического аппарата Луна-25 на поверхности Луны.

Ключевые слова: Луна-25, места посадки, Луна, цифровые модели рельефа, Солнечная система

DOI: 10.31857/S0320930X21060037

ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат Луна-25 станет первым отечественным аппаратом, запущенным к Луне после более чем 40-летнего перерыва. Основной целью миссии является проведение комплекса научных экспериментов по изучению состава и строения полярного реголита, а также лунной полярной экзосферы. На посадочном аппарате будет отработана технология мягкой посадки и длительной работы в условиях приполярной Луны.

Для обеспечения научных исследований аппарат Луна-25 должен решить следующие научно-технические задачи: 1) совершить мягкую посадку в заранее выбранном районе на поверхности Луны; 2) сохранить работоспособность после пребывания в условиях лунной ночи; 3) обеспечить энергетические и коммуникационные потребности бортовой научной аппаратуры в течение лунного дня.

Приоритетными задачами научных исследований на борту аппарата являются: 1) съемка изображения поверхности Луны в ходе посадки и панорамная съемка поверхности в точке посадки; 2) анализ состава образцов полярного грунта; 3) изучение плазменной, нейтральной и пылевой компонент полярной экзосферы.

Для достижения целей научных исследований был разработан метод выбора мест посадки (Дьячкова и др., 2017), основанный на пространственном анализе данных, полученных с космического аппарата NASA LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) (Vondrak и др., 2010). Благодаря разработанному методу в южном полярном регионе Луны были предварительно отобраны 11 районов-кандидатов, из которых были выбраны основной (69.55° ю.ш., 43.54° в.д.) и резервный (68.77° ю.ш., 21.21° в.д.) районы посадки. Выбор основного и резервного районов был сделан с учетом параметров орбиты космического аппарата перед посадкой. Резервный район выбран для обеспечения запаса времени продолжительностью несколько суток после пролета космического аппарата над основным районом на случай, если по каким-либо причинам посадка в него не была произведена. Характеристикам выбранных районов посадки посвящена данная статья.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫБРАННЫХ РАЙОНОВ ПОСАДКИ

Основной задачей после выбора основного и запасного мест посадки стали работы по их геоинформационному обеспечению. Основой со-

Таблица 1. Параметры распределений значений высот в пределах выбранных основного и запасного эллипсов посадки для используемых цифровых моделей рельефа

	Основное место посадки				Запасное место посадки			
	GLD100	LOLADEM 30 м	LOLADEM 60 м	SLDEM2013	GLD100	LOLADEM 30 м	LOLADEM 60 м	SLDEM2013
Средняя высота поверхности, м	448	455	454	454	667	685	685	686
Перепад высот, м	610	740	743	744	311	412	412	438
Стандартное отклонение, м	128	133	133	134	65	65	65	66

зданной инженерной модели для территории выбранных районов посадки стали цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения. Был выполнен расчет основных характеристик рельефа, являющихся основными факторами безопасности при посадке.

Используемые цифровые модели рельефа

Цифровая модель рельефа WAC (ЦМР WAC или глобальная лунная модель высот с разрешением 100 м – GLD100) была получена из наблюдений с широкоугольной камерой WAC (Wide Angle Camera), установленной на борту КА NASA LRO. Эта модель охватывает 98.2% лунной поверхности. Модель GLD100 была получена с помощью цифровых фотограмметрических методов из 69000 стереомоделей WAC. Каждый 100-метровый пиксел модели имеет в среднем 26 стереоточек, что обеспечивает точность вычисления высоты поверхности порядка 10–20 м. Средняя относительная трехмерная точность для набора точек, на основе которого была создана модель GLD100, составляет 18 м, что соответствует 0.24 пиксела в модели WAC (Scholten и др., 2012). Таким образом, модель GLD100 является цифровой моделью рельефа с относительно высоким пространственным разрешением. Остающееся постоянным на всем протяжении этой модели пространственное разрешение обеспечивает надежность использования, отсутствие “артефактов” и достоверность морфометрических показателей, рассчитанных на ее основе. Значения морфометрических параметров, вычисленных на основе этой модели рельефа, стали реперными для сравнения с аналогичными параметрами, рассчитанными впоследствии по другим моделям.

Средняя абсолютная высота для выбранного основного эллипса посадки составляет 448 м, перепад высот – 610 м. Для резервного эллипса посадки аналогичные значения равны 667 и 311 м соответственно. Сравнение показателей распределения высот по цифровой модели рельефа GLD100 с другими описанными ниже используемыми моделями – LOLADEM с пространственным разрешением 30 и 60 м и SLDEM2013 – приведено в табл. 1. Перепады высот, полученные по ЦМР GLD100, в значительной степени отличаются от перепадов высот, полученных по двум другим моделям. Однако это не стало ограничением для ее использования при анализе характера рельефа в границах выбранных эллипсов посадки: разрешение модели позволяет оценить крупные формы рельефа и тренды поверхности.

Инструмент Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA), установленный на КА NASA LRO, обеспечивает точную глобальную модель лунной топографии, являющуюся на данный момент общепринятой (Smith и др., 2017). Одной из основных целей создания такой модели стало обеспечение будущих лунных посадочных миссий данными, необходимыми для безопасной посадки и последующего функционирования на лунной поверхности. Данные типа DEM (Digital Elevation Model) представляют собой цифровые модели рельефа, полученные по альтиметрическим измерениям с прибором LOLA. Каждый набор данных содержит результаты измерений, полученных в различные фазы миссии, интерполированные на равномерной сетке. Значение в пикселе модели DEM представляет собой среднее значение высоты поверхности в центре области, ограниченной линиями постоянной долготы и широты. Для создания моделей высот основного и резервного эллипсов посадки были выбраны модели с разрешением 512 пикселов/градус (59.2 м) и 1024 пиксела/градус (29.6 м). Выбор модели с более низким пространственным разрешением (≈60 м) объясняется более полным учетом данных измерений, в то время как модель с самым высоким из доступных для данного набора данных разрешением (≈30 м) хотя и сообщает больше информации о поверхности, не содержит данных наиболее новых измерений с прибором LOLA. Карты высот, составленные по цифровой модели рельефа LOLADEM с разрешением 512 пикселов/градус для выбранных основного и запасного мест посадки, представлены на рис. 1 и 2. Характеристики рельефа, рассчитанные по данным моделям, приведены в табл. 1.

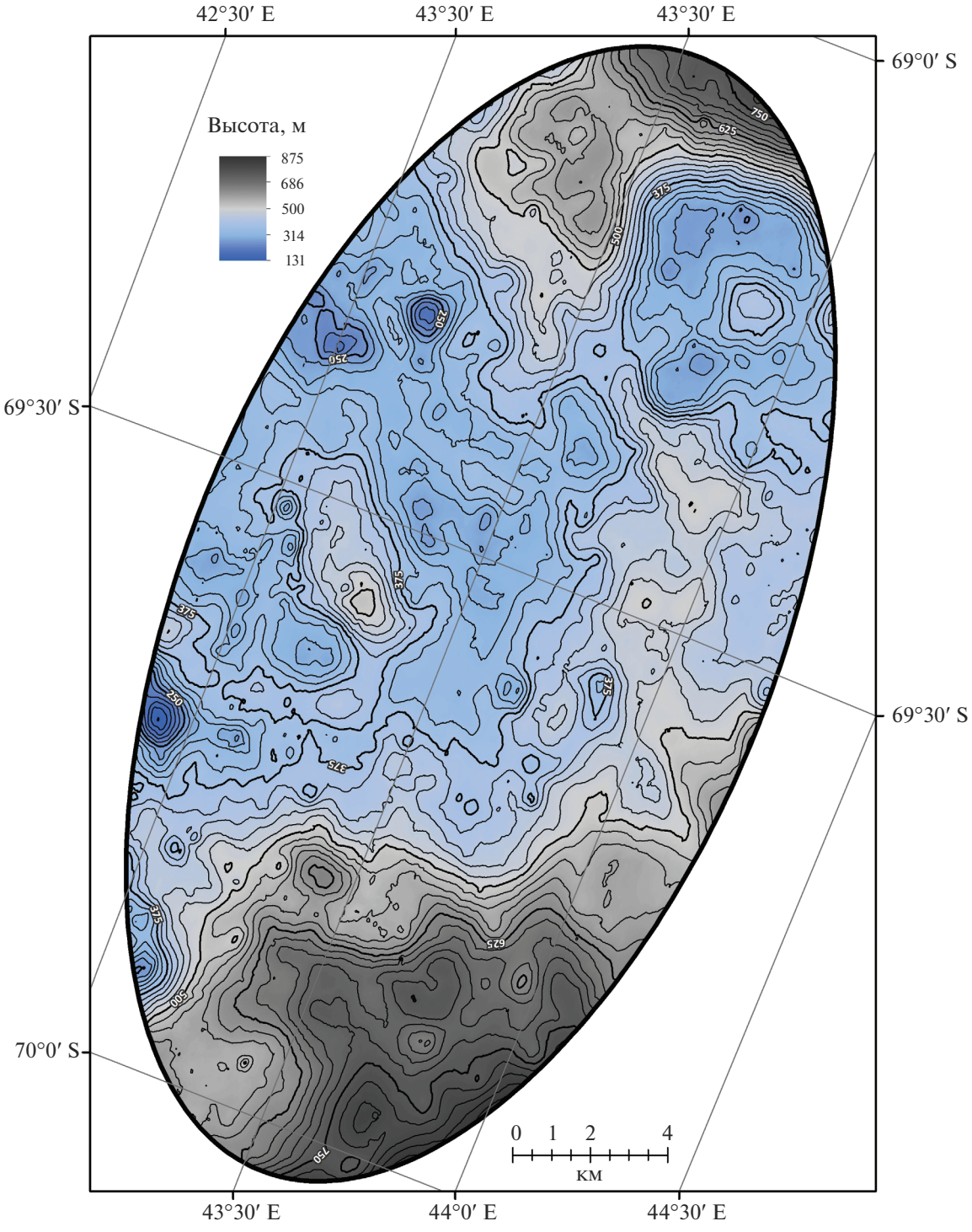


Рис. 1. Визуализация ЦМР LOLADEM с разрешением 512 пикселов/градус в виде гипсометрической карты для выбранного основного места посадки. Горизонтали проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

Благодаря созданному Японским космическим агентством (JAXA) космическому аппарату Kaguya были получены обширные топографические данные о лунной поверхности. Для целей нашей работы была использована глобальная цифровая модель рельефа SLDEM2013, созданная JAXA с учетом данных, полученных с прибором LOLALRO (Haruyama и др., 2014). Созданная глобальная бесшовная ЦМР имеет номинальное разрешение 7 м. Анализ полученной модели по-

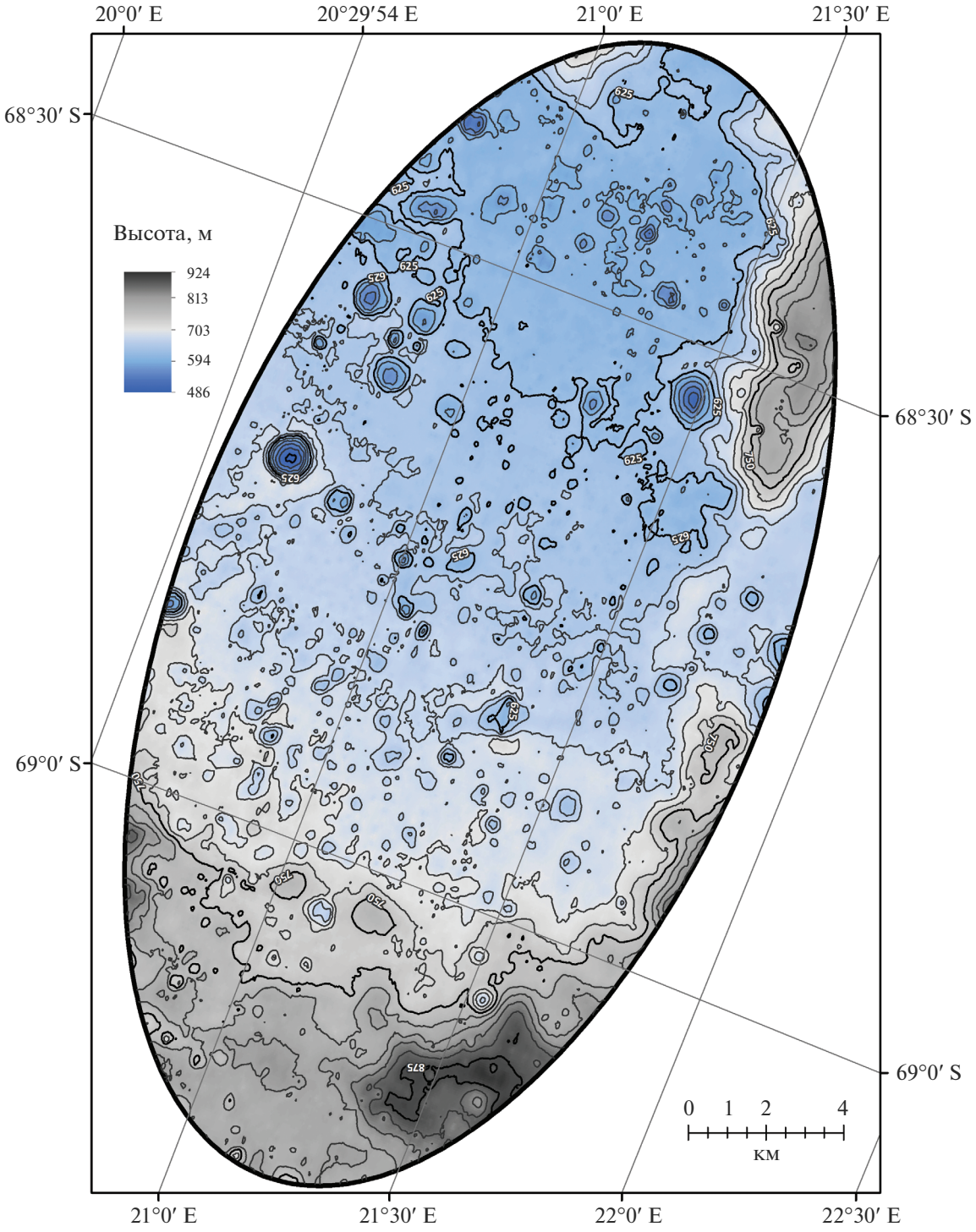


Рис. 2. Визуализация ЦМР LOLADEM с разрешением 512 пикселов/градус в виде гипсометрической карты для выбранного запасного места посадки. Горизонтали проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 0° в.д.

казал, что ее реальное разрешение не соответствует номинальному. Наличие множественных "артефактов" (областей, где характер поверхности модели резко и очевидно отличается от реальной поверхности), связанных с особенностями работы камеры, затрудняет использование этой цифровой модели рельефа в качестве основного источника информации о рельефе поверхности. Согласно исследованию (Barker и др., 2016) фактическое пространственное разрешение модели

Таблица 2. Параметры распределений значений высот по используемым ЦМР в пределах покрытия выбранного основного места посадки цифровой моделью рельефа NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1

	GLD100	LOLA DEM 30 м	LOLA DEM 60 м	SLDEM2013	NAC DTM
Средняя высота поверхности, м	481	486	484	483	485
Перепад высот, м	558	600	599	616	615
Стандартное отклонение, м	147	151	151	153	152

SLDEM2013 составляет около 60 м. Поэтому данная модель была использована лишь в качестве вспомогательной.

Визуализации цифровых моделей рельефа на основе ЦМР SLDEM2013 для выбранных основного и запасного мест посадки представлены на рис. 3 и 4. Средняя высота для выбранного основного эллипса посадки составляет 454 м, перепад высот – 744 м. Для запасного эллипса посадки аналогичные показатели равны 686 и 438 м соответственно. Эти значения показателей параметров рельефа поверхности выбранных мест посадки достаточно хорошо согласуются между собой для ЦМР LOLADEM и ЦМР SLDEM2013 (см. табл. 1).

Цифровая модель рельефа NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1 из специального набора данных SDNDTM (Special Data Record NAC Digital Terrain Map) узкоугольной камеры NAC (Narrow Angle Camera) в составе инструмента LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera) на борту КА LRO (Robinson и др., 2010) была создана специально по нашему запросу командой прибора NAC для основного района посадки. Для этого была выполнена специальная съемка лунной поверхности под необходимым углом для создания стереомодели рельефа. Полученные четыре снимка (M1225780220 L/R и M1225794288 L/R) были использованы для создания цифровой модели рельефа с центром в точке с координатами 69.59° ю.ш. и 43.57° в.д. Высокое пространственное разрешение снимков, равное 60 см, позволило создать ЦМР NAC для центральной области основного района посадки с очень высоким разрешением 2 м, сравнимым с размерами спускаемого аппарата. Точность модели по вертикали, которая определяется как среднеквадратическое отклонение разницы высот между полученной моделью и точечными измерениями альтиметра LOLA, составляет около 1 м.

Несмотря на возможное наличие артефактов, связанных с некорректным вычислением высот в сильно затененных областях, а также с наличием “швов” вдоль границ перекрытий снимков, данная модель ЦМР NAC наиболее достоверно отображает реальную поверхность центральной области основного района посадки. Наличие артефактов отражено на сопутствующей “карте доверия”, где доля “ненадежных” пикселов составляет лишь 0.06% от их общего количества. Это позволяет принять цифровую модель рельефа NAC эталонной для центральной области основного района посадки, которую она покрывает. Ее недостатком является лишь пространственный охват, который покрывает около 32% основного посадочного эллипса (рис. 5).

Средняя высота поверхности для участка поверхности основного эллипса посадки, покрытого данной цифровой моделью рельефа, составила 485 м, а перепад высот – 615 м. Сравнение с аналогичными показателями, полученными по другим цифровым моделям, описанным выше, приведено в табл. 2. Анализ форм распределений высот показал, что наилучшее согласие с эталоном ЦМР NAC имеет модель поверхности, соответствующая цифровой модели рельефа LOLA DEM с пространственным разрешением 60 м, в то время как для других характеристик рельефа более точно соответствует эталону NAC модель рельефа SLDEM2013.

Таким образом, территория районов посадки обеспечена данными о рельефе поверхности с разрешением до 2 м для основного района посадки и до 30 м для запасного района посадки.

Расчет морфометрических параметров

Основными морфометрическими параметрами поверхности являются уклон и экспозиция склонов. Фундаментальные морфометрические параметры уклона и экспозиции поверхности взаимосвязаны. Оба показателя характеризуют градиент поверхности, то есть интенсивность изменения значений ее высот в пространстве, которая может быть выражена первой производной. Как производная поверхности первого порядка, градиент характеризуется величиной (уклоном) и направлением (экспозицией).

Уклоны поверхности

Исходя из инженерных требований, КА Луна-25 может успешно сесть на поверхность с пологим уклоном до 7°. Посадка на покатый склон с уклоном 7°–15° возможна, но сопряжена с риском опрокидывания. Посадка на более крутой склон >15°

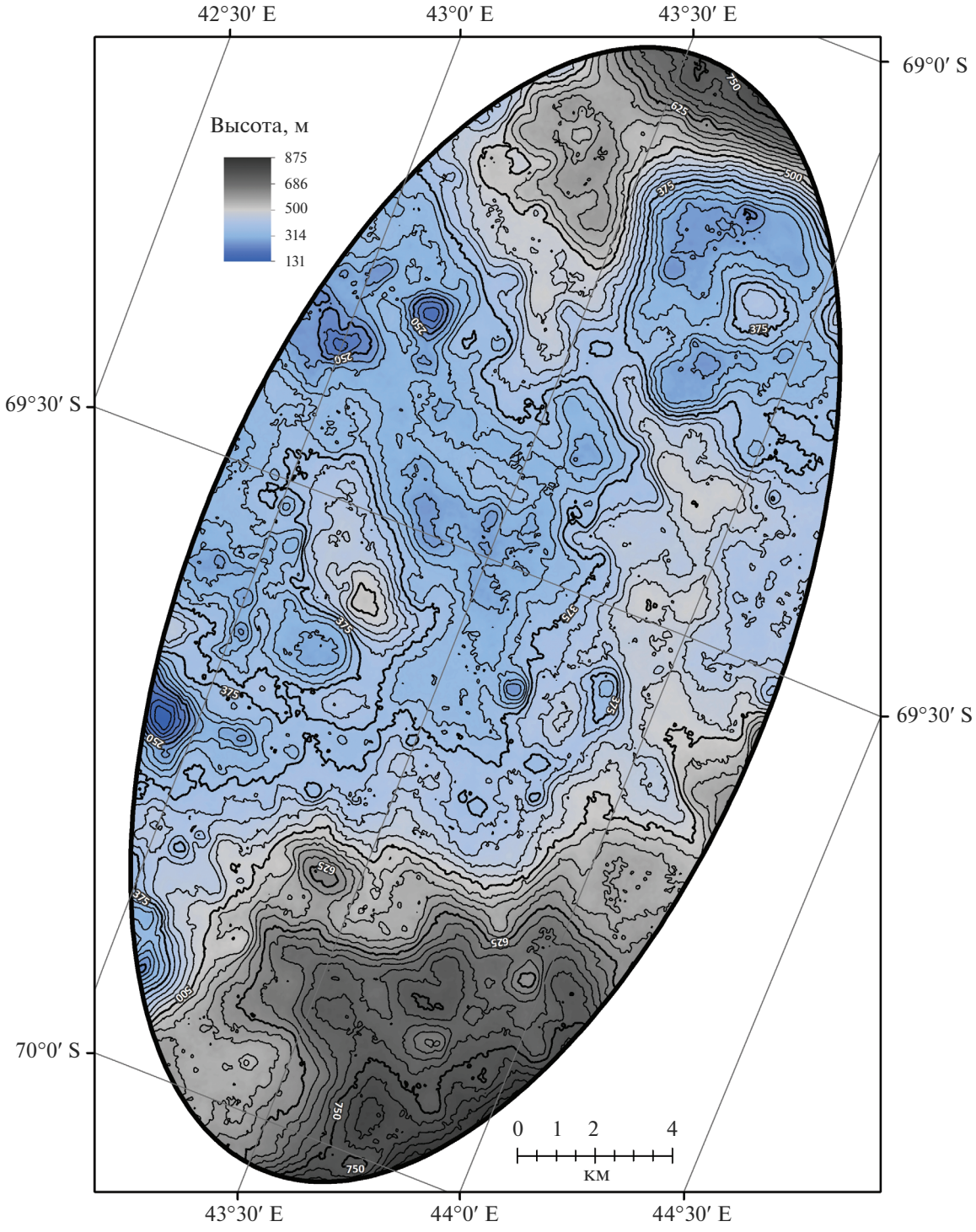


Рис. 3. Визуализация ЦМР SLDEM в виде гипсометрической карты для выбранного основного места посадки. Горизонтали проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

приводит к вероятному опрокидыванию аппарата. Кроме этого, экспозиция склона поверхности определяет величину солнечной энергии, приходящей на поверхность. Увеличение уклона поверхности в направлении к Солнцу увеличивает угол падения солнечных лучей, и, следовательно, количество энергии, которое поглощает поверхность. Это определяет микроклиматические особенности участка, в частности температуру грунта.

Общий уклон поверхности определяется как градиент в направлении максимального уклона и может быть рассчитан несколькими способами на

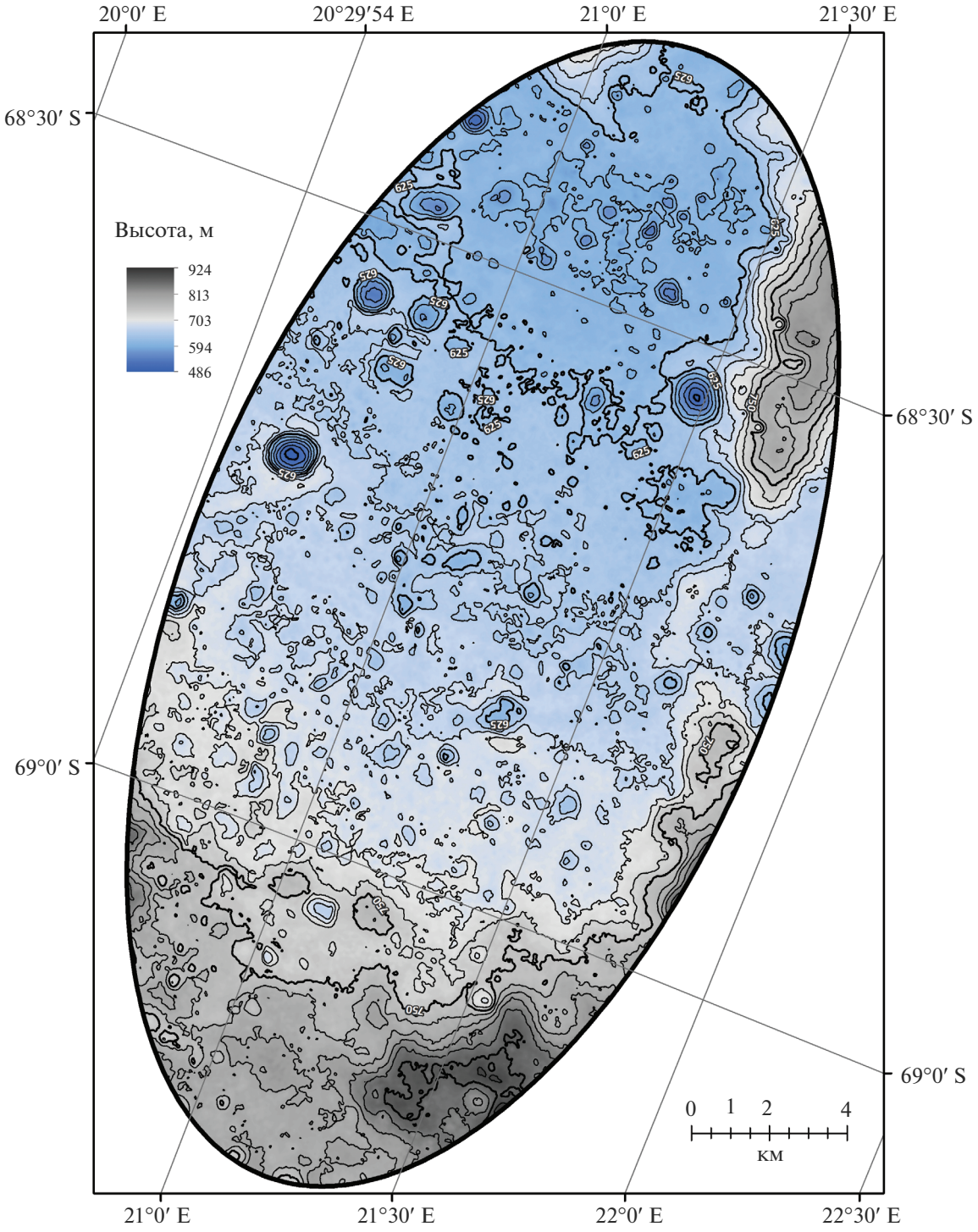


Рис. 4. Визуализация ЦМР SLDEM в виде гипсометрической карты для выбранного запасного места посадки. Горизонтали проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 0° в.д.

основе вычисления значений изменения высот в двух направлениях: с севера на юг и с востока на запад. Наиболее распространенными методами для вычисления уклона поверхности являются: алгоритм четырех ячеек (Zevenbergen, Thorne, 1987), алгоритм Хорна (Horn, 1981; Burroughand, McDonnell, 1998) и алгоритм Шарпнэка и Эйкина (Sharpnack, Akin, 1969; Florinsky, 1998).

Ниже для расчета уклонов на территории основного и резервного районов посадки были использованы алгоритм четырех ячеек и алгоритм Хорна.

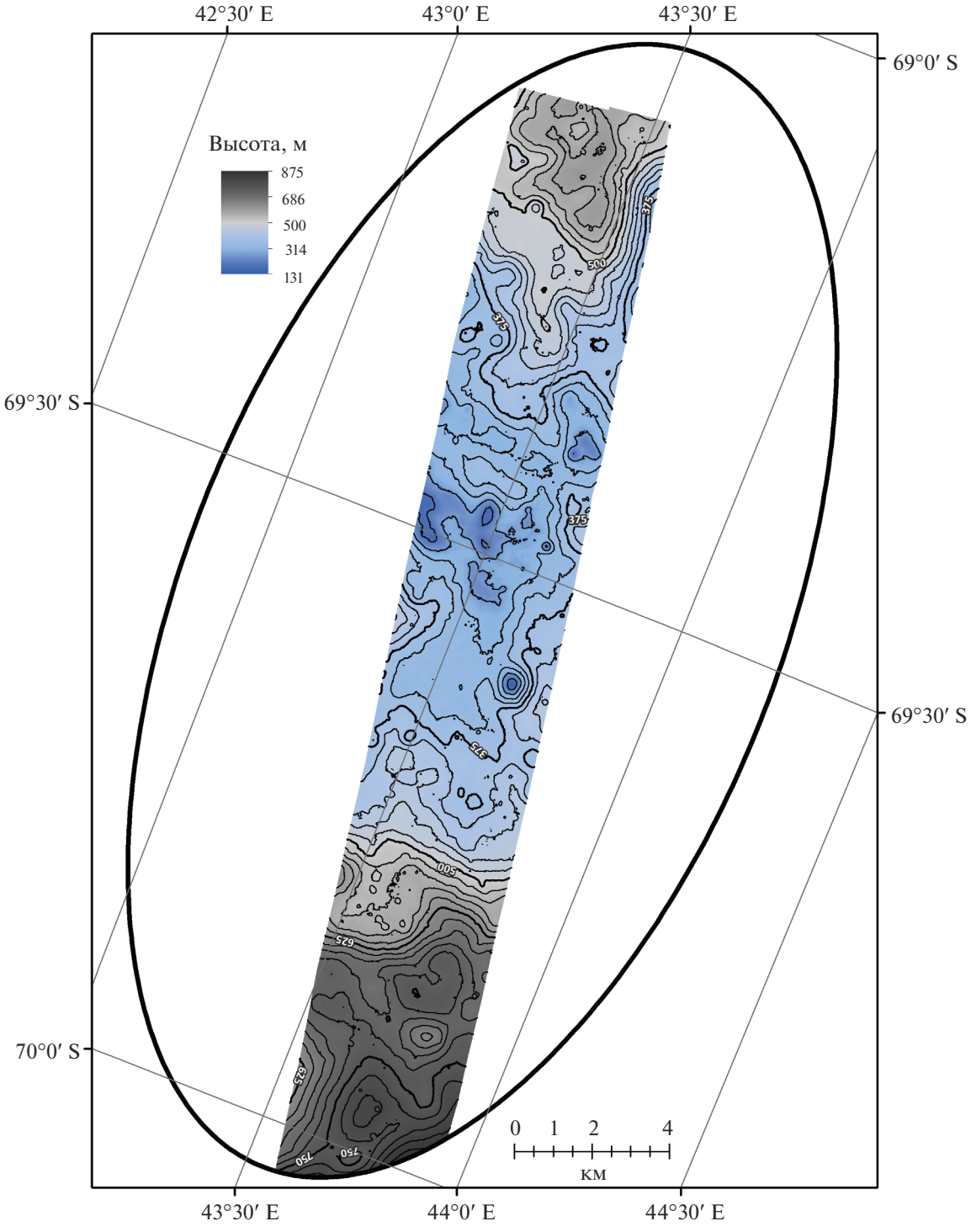


Рис. 5. Визуализация ЦМР NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1 в виде гипсометрической карты для части поверхности выбранного основного места посадки. Горизонтали проведены через 25 м. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

Алгоритм четырех ячеек лучше всего отражает уклон поверхности на площади, приблизительно в 1.6 раз большей, чем размер площади ячейки исходного растра. Например, для исходного растра с размером ячейки 30 м размер территории, характеризуемой рассчитанным по алгоритму четырех ячеек уклоном поверхности, будет составлять приблизительно 19 м от центра ячейки, то есть

Таблица 3. Параметры распределений значений уклонов поверхности в пределах выбранного основного эллипса посадки в зависимости от используемых цифровых моделей рельефа и алгоритмов вычисления

	GLD100		LOLADEM 30 м		LOLADEM 60 м		SLDEM2013	
	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна
Средний уклон поверхности	3.15°	3.14°	4.58°	4.49°	3.55°	3.52°	4.60°	4.49°
Стандартное отклонение уклона поверхности	1.99°	1.99°	3.11°	3.02°	2.51°	2.50°	3.53°	3.31°
Процент площади эллипса с уклоном более 7°	3.36%	3.35%	13.66%	12.98%	7.46%	7.41%	26.58%	20.42%
Процент площади эллипса с уклоном более 15°	0.00%	0.00%	0.68%	0.59%	0.09%	0.07%	0.59%	0.40%

Таблица 4. Параметры распределений значений уклонов поверхности в пределах выбранного запасного эллипса посадки в зависимости от используемых цифровых моделей рельефа и алгоритмов вычисления

	GLD100		LOLADEM 30 м		LOLADEM 60 м		SLDEM2013	
	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна
Средний уклон поверхности	1.40°	1.39°	3.08°	2.94°	4.04°	3.83°	5.59°	5.39°
Стандартное отклонение уклона поверхности	1.23°	1.23°	2.99°	2.78°	3.38°	3.20°	4.19°	3.85°
Процент площади эллипса с уклоном более 7°	0.01%	0.02%	7.78%	6.50%	12.72%	11.26%	33.53%	23.75%
Процент площади эллипса с уклоном более 15°	0.00%	0.00%	0.80%	0.59%	1.32%	1.06%	2.88%	2.05%

эффективное пространственное разрешение выходного растра уклонов поверхности составит ≈38 м при номинальном разрешении в 30 м.

Элемент поверхности, характеризуемый рассчитанным по алгоритму Хорна уклоном, имеет площадь, в два раза превышающую площадь ячейки исходного растра цифровой модели рельефа. То есть для входного растра с размером ячейки 30 м размер территории, для который вычислен уклон по алгоритму Хорна, будет составлять около 21 м от центра исходной ячейки, соответственно пространственное разрешение выходного растра уклонов составит ≈42 м.

Уклоны поверхности были вычислены по всем описанным выше цифровым моделям рельефа. Сравнение распределений значений уклонов поверхности для выбранных основного и резервного районов представлены в табл. 3 и 4, соответственно. Как видно из сравнения, основной вклад в разницу параметров вносит не алгоритм их вычисления, а используемая цифровая модель рельефа. Основным результатом исследования уклонов поверхности стали значения доли крутых склонов, имеющих уклон более 15°. Эти значения составили менее 1% для основного района посадки и менее 3% для резервного района. Этот результат характеризует территорию выбранных районов как безопасную для посадки. На рис. 6 и 7 представлены карты уклонов поверхности для этих районов, рассчитанные на основе цифровой модели рельефа LOLA DEM и на основе цифровой модели рельефа SLDEM2013.

С использованием цифровой модели рельефа NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1, имеющей пространственное разрешение 2 м, была построена карта уклонов поверхности для 32% территории основного района посадки с разрешением ~4 м, сравнимым с размерами посадочного КА (рис. 8). Около 97% площади основного района посадки, покрытой цифровой моделью рельефа NAC, имеет уклон поверхности менее 15°, аналогичное значение для площади с уклоном менее 7° составляет около 70%.

Можно сравнить оценки для значений уклонов, полученных по другим моделям в пределах территории покрытия данной моделью NAC (табл. 5). Оказалось, что наиболее близким к эталонному оказалось распределение уклонов, рассчитанных по цифровой модели рельефа SLDEM2013.

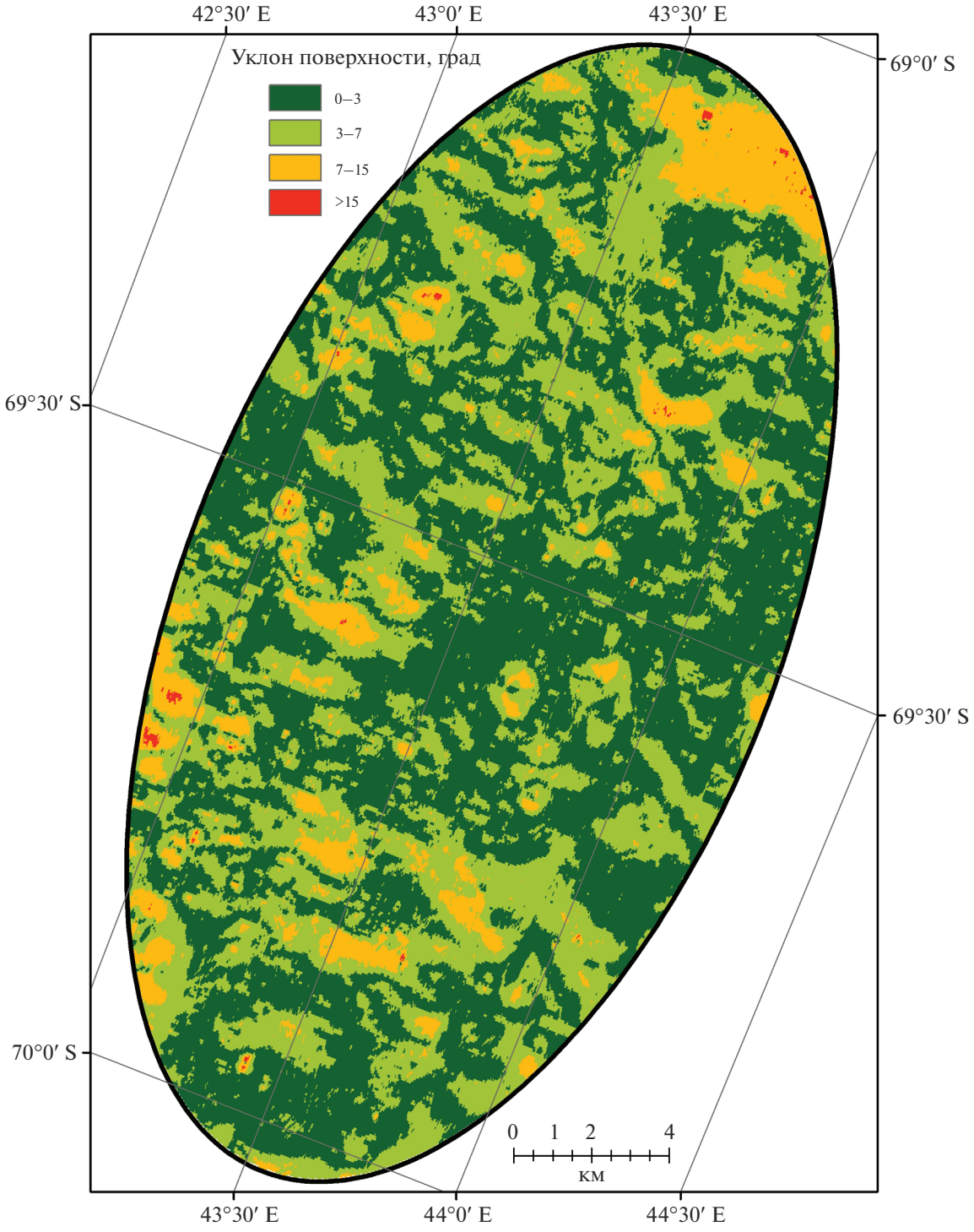


Рис. 6. Карта уклонов поверхности, рассчитанных с помощью алгоритма четырех ячеек на основе ЦМР LOLA DEM с разрешением 512 пикселов/градус для выбранного основного места посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

Экспозиция склонов

Экспозиция поверхности определяется как угол, измеренный по часовой стрелке на горизонтальной плоскости между проекцией определенного направления (как правило, на север) и проекцией уклона на горизонтальную плоскость. Экспозиция фиксирует направление (азимут) максимального уклона (градиента) поверхности и таким образом определяет ориентацию участка

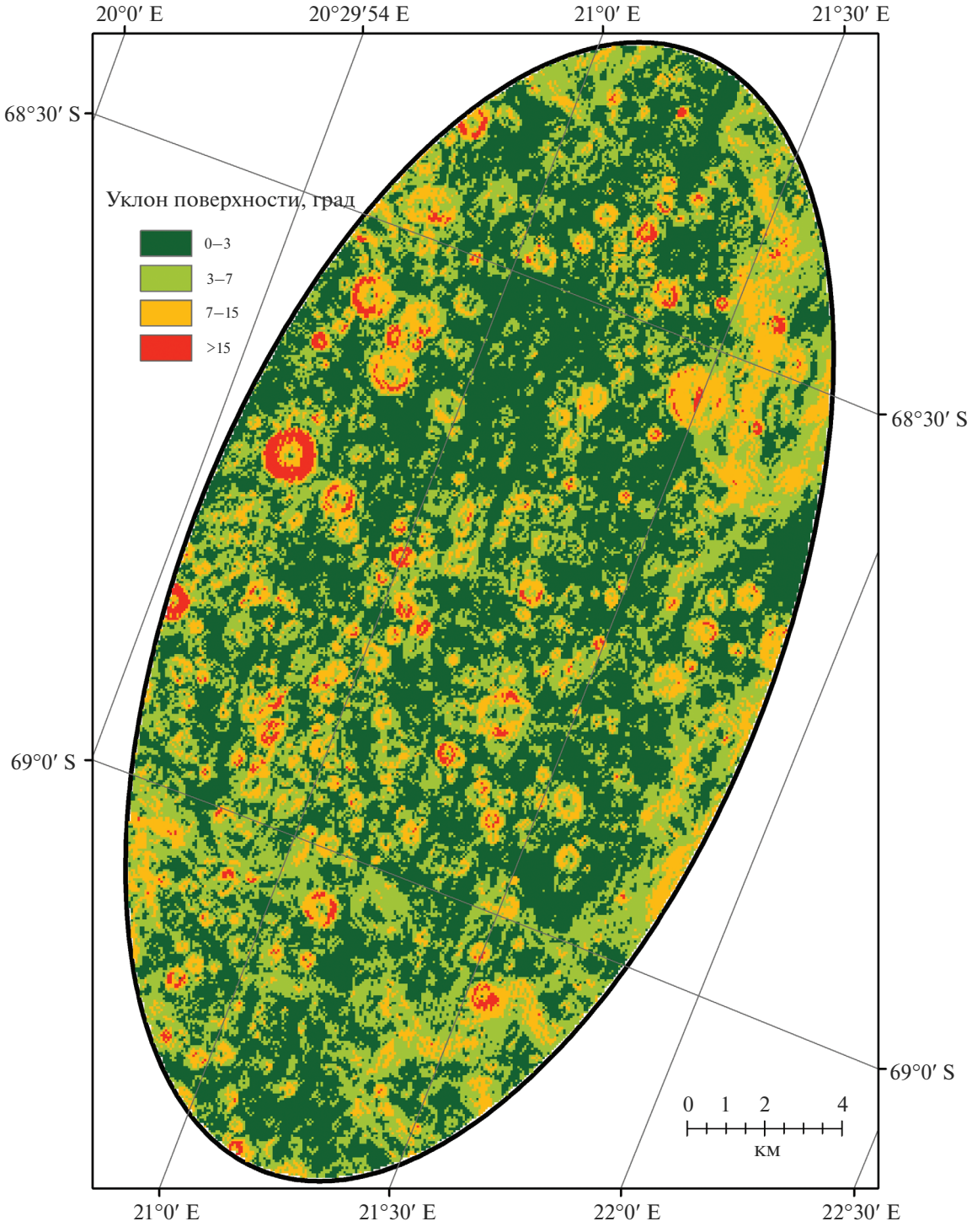


Рис. 7. Карта уклонов поверхности, рассчитанных с помощью алгоритма четырех ячеек на основе ЦМР LOLA DEM с разрешением 512 пикселов/градус для выбранного запасного места посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 0° в.д.

по отношению к потоку солнечных лучей. Благодаря этому экспозиция существенно влияет на локальный климат участка. Например, для южного полушария характерно более сильное прогревание склонов северной экспозиции по сравнению с южными. Кроме этого, склоны восточной и западной ориентации, формально имея одинаковую экспозицию, демонстрируют различие температурных условий. Это объясняется тем, что на восточные склоны солнечные лучи попа-

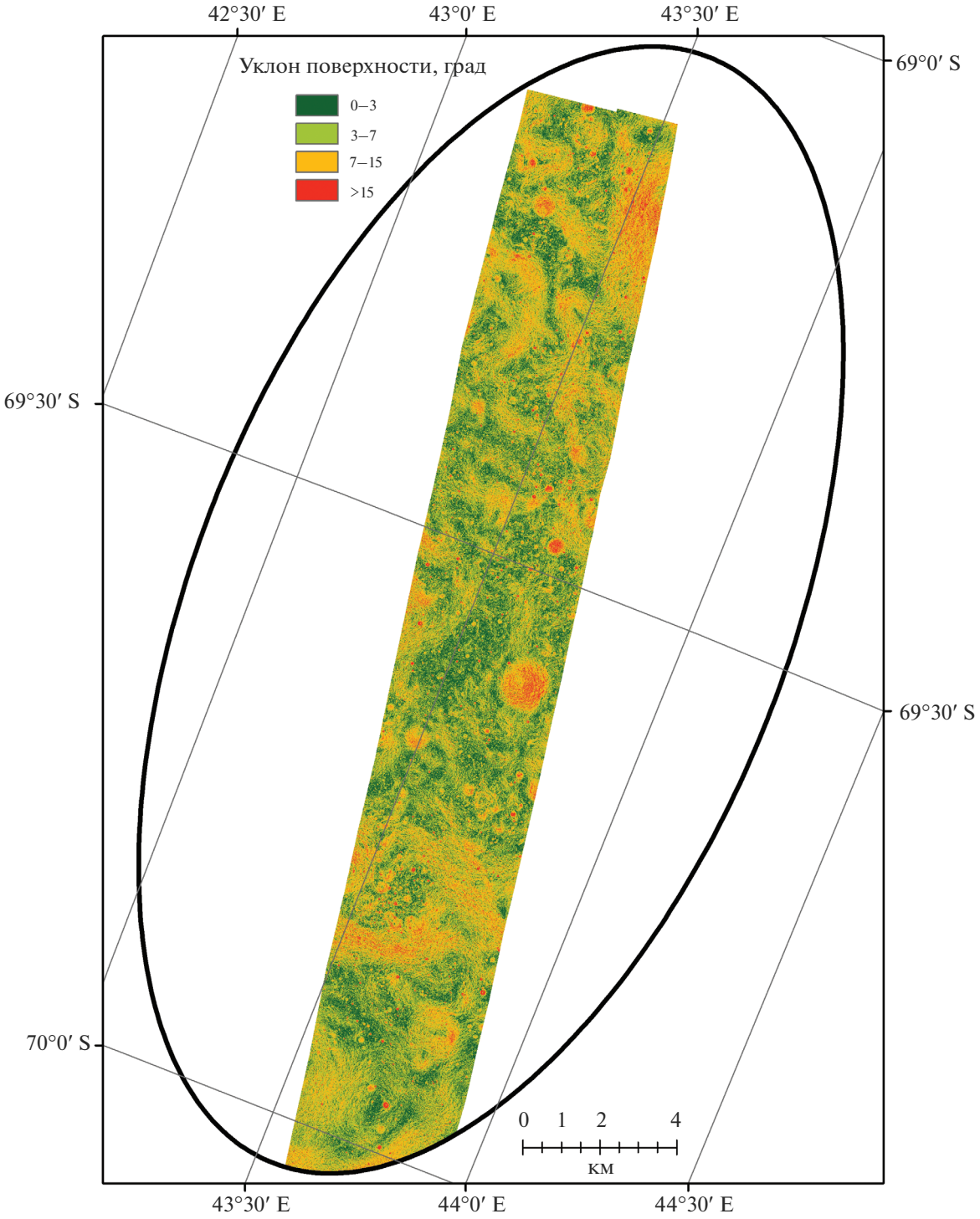


Рис. 8. Карта уклонов поверхности, рассчитанных с помощью алгоритма четырех ячеек на основе ЦМР NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1 для выбранного основного места посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

дают утром и поглощенная энергия уходит на нагревание поверхности, а западные склоны освещаются во второй половине дня, когда поверхность уже нагрета. В результате, западные склоны обычно в среднем теплее, чем восточные.

Для основного и запасного районов посадки наиболее благоприятными для тепловых условий КА являются склоны южной, юго-восточной и юго-западной экспозиций. Такие склоны в окрестности южного полюса характеризуются

Таблица 5. Параметры распределений значений уклонов поверхности в пределах поверхности покрытия цифровой моделью рельефа NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1 выбранного основного эллипса посадки в зависимости от используемых цифровых моделей рельефа и алгоритмов вычисления

	NAC DTM		GLD100		LOLADEM 30 м		LOLADEM 60 м		SLDEM2013	
	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна
Средний уклон поверхности	6.17°	6.07°	3.02°	3.01°	4.21°	4.12°	3.23°	3.20°	4.31°	4.19°
Стандартное отклонение уклона поверхности	3.90°	3.78°	1.77°	1.77°	2.54°	2.43°	2.02°	2.01°	3.25°	3.01°
Процент площади эллипса с уклоном более 7°	30.47%	29.41%	1.78%	1.76%	9.76%	8.86%	3.85%	3.82%	23.51%	17.44%
Процент площади эллипса с уклоном более 15°	2.60%	2.21%	0.00%	0.00%	0.14%	0.08%	0.01%	0.01%	0.19%	0.11%

меньшими потоками энергии от солнечных лучей по сравнению с северными склонами. Необходимость уменьшения потока солнечной энергии связана с конструкцией системы обеспечения теплового режима КА, плоскость радиатора которой расположена наверху аппарата перпендикулярно его вертикальной оси. Рекомендуемый угол падения солнечных лучей на радиатор не должен превышать 20°, что для идеальной сферической поверхности соответствует широте места посадки 70° ю.ш. Широта основного и запасного мест посадки составляет 69.545° и 68.773° ю.ш. соответственно, что приводит к небольшому превышению угла падения солнечных лучей относительно требуемого. Южная, юго-восточная и юго-западная экспозиции склона фактического участка места посадки компенсируют это увеличение. С другой стороны, северная экспозиция склона ухудшает тепловой режим КА во время лунного полдня.

Общая экспозиция элемента поверхности определяется как азимут его уклона. Карты экспозиции склонов были построены на основе всех созданных карт уклонов. На рис. 9 и 10 представлены карты экспозиций для выбранных основного и резервного районов посадки.

Сравнение значений экспозиций склонов, полученных различными алгоритмами на основе различных цифровых моделей рельефа, представлены в табл. 6 и 7. Оказалось, что в пределах основного и резервного районов преобладают склоны с северной и западной экспозициями, являющиеся более “горячими” с точки зрения температурного режима. Однако, благодаря небольшим значениям средних уклонов, преобладание склонов северной и западной экспозиций не должно привести к значительному увеличению угла падения солнечных лучей на поверхность участка посадки.

Карты экспозиции поверхности, рассчитанные на основе цифровой модели рельефа NAC, представлены на рис. 11. Для части поверхности основного района посадки, покрытой данной моделью рельефа, экспозиции поверхности распределены по направлениям следующим образом. Рассчитанные на основе алгоритма четырех ячеек склоны северной, северо-восточной и северо-западной экспозиций составили 39.4% поверхности, склоны восточной экспозиции – 11.9%, склоны южной, юго-восточной и юго-западной экспозиций – 32.6%, а склоны западной экспозиции составили 16.1% от всей поверхности покрытия цифровой модели рельефа NAC. Для направлений экспозиций поверхности, рассчитанных на основе алгоритма Хорна, значения долей поверхности составили 39.6, 11.9, 32.3, 16.2% соответственно.

ОЦЕНКА ПЕРИОДОВ ОСВЕЩЕННОСТИ И УСЛОВИЙ РАДИОВИДИМОСТИ ДЛЯ ВЫБРАННЫХ ОСНОВНОГО И ЗАПАСНОГО МЕСТ ПОСАДКИ

Расчет линии локального горизонта

Для характеристики условий освещенности и радиовидимости в точке посадки необходимо вычисление видимой линии локального горизонта. На основе данных ЦМР для выбранных основного и запасного мест посадки были построены локальные линии горизонта. Алгоритм построения линии горизонта выглядит следующим образом. Данные ЦМР приводятся к такому виду, что все ее точки характеризуются набором сферических координат: $(\varphi_i, \lambda_i, r_i)$, где φ_i – широта i-ой точки модели поверхности, λ_i – ее долгота, а r_i – радиус вектор i-ой точки из центра Луны. Используя полученные данные, можно найти расстояние и

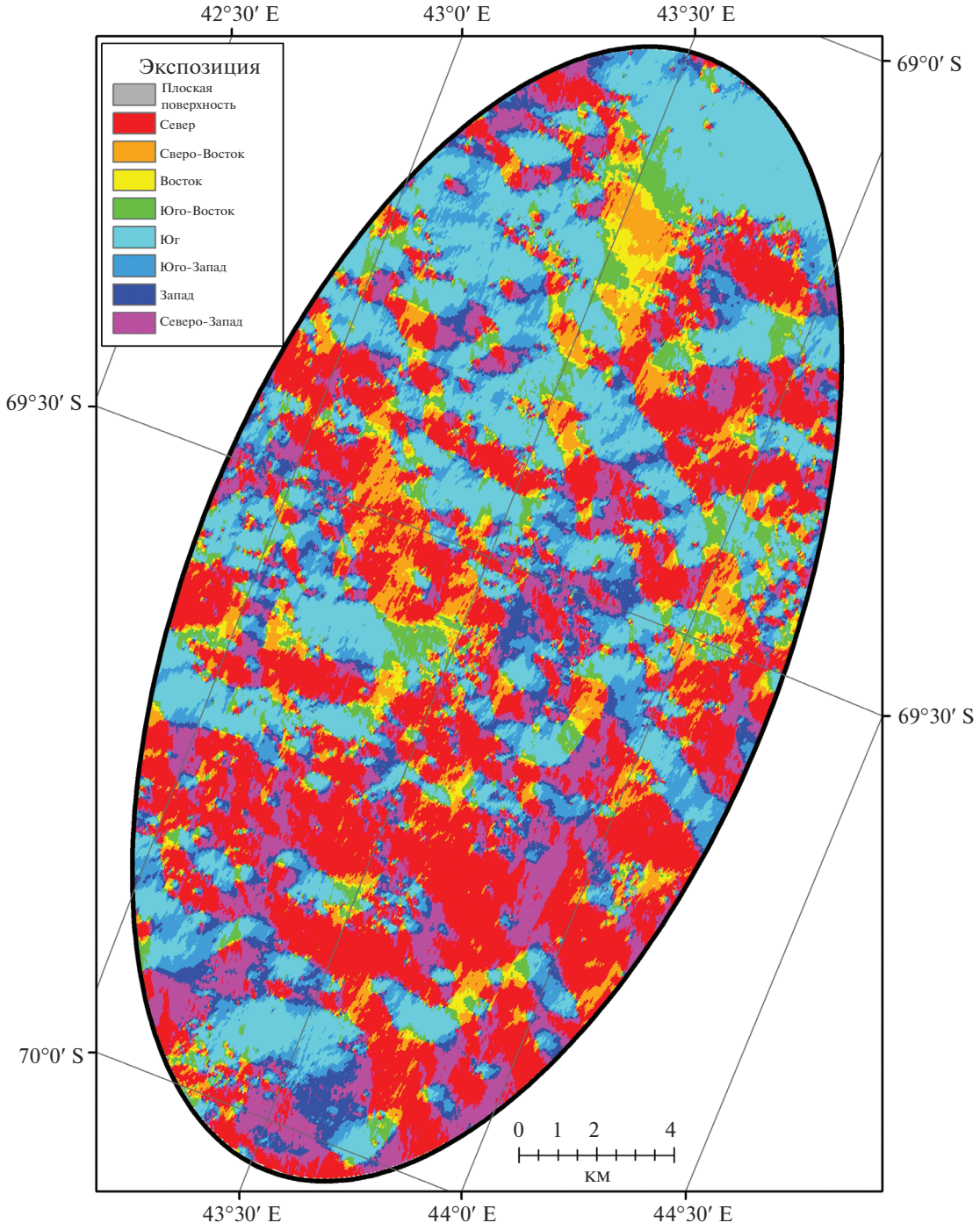


Рис. 9. Карта экспозиции поверхности, рассчитанной с помощью алгоритма четырех ячеек на основе ЦМР LOLADEM с разрешением 512 пикселов/градус для выбранного основного места посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

азимут каждой точки модели поверхности от наблюдателя, которым в данном случае является севший на поверхность Луны КА, расположенный в точке со сферическими координатами $(\varphi_0, \lambda_0, r_0)$, при этом учитывается высота КА. Расстояние от наблюдателя до i-ой точки, измеренное вдоль дуги большого круга их соединяющего, можно найти по следующей формуле:

$$d = R \arccos(\sin\varphi_0 \sin\varphi_i + \\ + \cos\varphi_0 \cos\varphi_i \cos(\lambda_0 - \lambda_i)), \quad (1)$$

где R – радиус Луны.

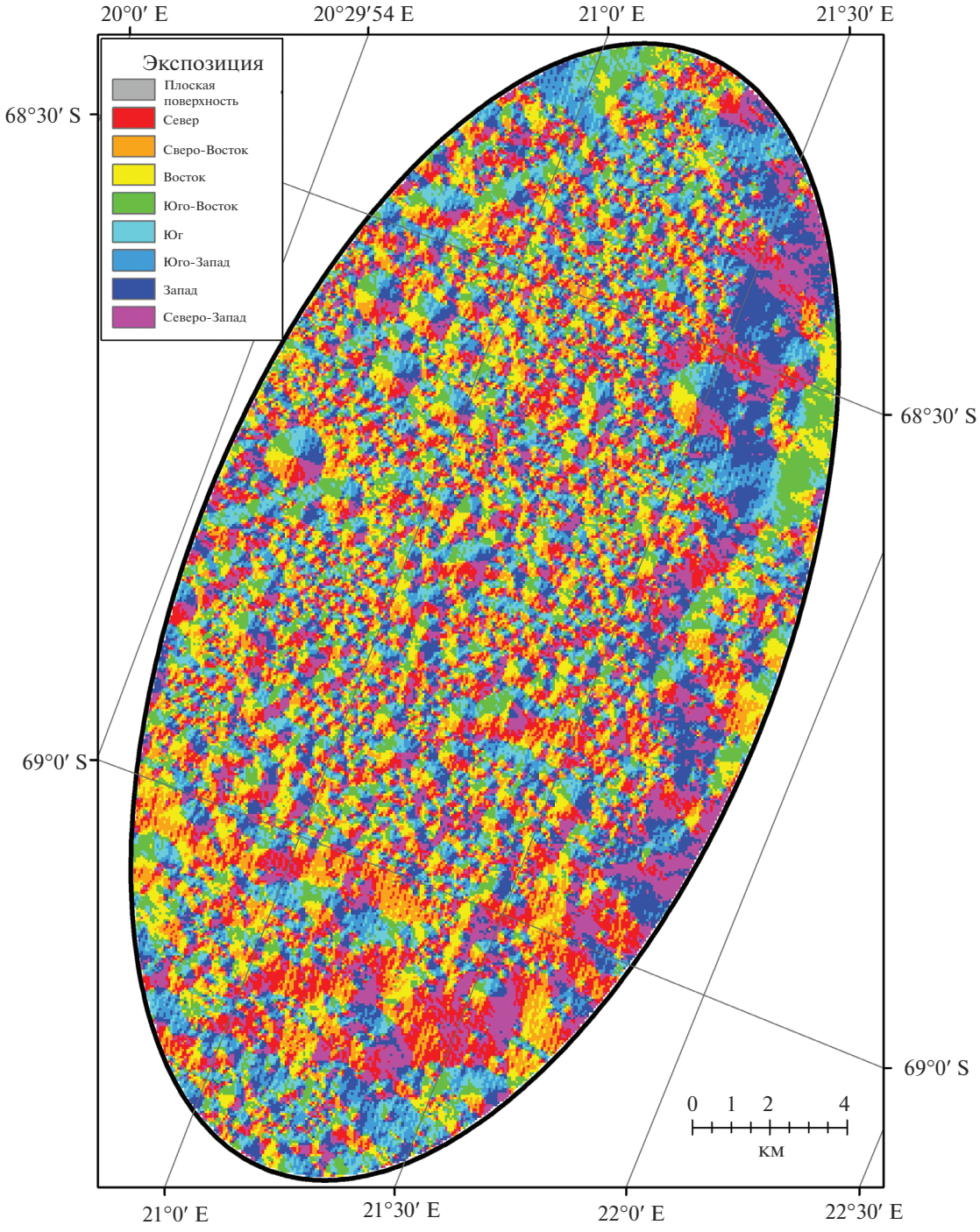


Рис. 10. Карта экспозиции поверхности, рассчитанной с помощью алгоритма четырех ячеек на основе ЦМР LOLADEM с разрешением 512 пикселов/градус для выбранного запасного места посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 0° в.д.

Азимут можно найти по формуле:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{2\cos\varphi_i}{\operatorname{tg}\left(\frac{\lambda_0-\lambda_i}{2}\right)\sin\left(\varphi_0+\varphi_i\right)+\operatorname{ctg}\left(\frac{\lambda_0-\lambda_i}{2}\right)\sin\left(\varphi_i-\varphi_0\right)}\right). \quad (2)$$

Таблица 6. Параметры распределений экспозиций склонов в пределах выбранного основного эллипса посадки в зависимости от используемых цифровых моделей рельефа и алгоритмов вычисления

	GLD100		LOLADEM 30 м		LOLADEM 60 м		SLDEM2013	
	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна
Процент площади эллипса с северной (СЗ, С, СВ) экспозицией	53.86%	53.62%	42.74%	44.11%	51.73%	51.79%	60.86%	57.69%
Процент площади эллипса с восточной (В) экспозицией	9.37%	9.37%	10.23%	8.88%	3.25%	3.14%	3.02%	2.85%
Процент площади эллипса с южной (ЮВ, Ю, ЮЗ) экспозицией	22.26%	22.33%	26.41%	28.90%	38.27%	38.42%	30.95%	34.61%
Процент площади эллипса с западной (З) экспозицией	14.51%	14.60%	20.62%	18.11%	6.75%	6.65%	5.17%	4.85%

Таблица 7. Параметры распределений экспозиций склонов в пределах выбранного запасного эллипса посадки в зависимости от используемых цифровых моделей рельефа и алгоритмов вычисления

	GLD100		LOLADEM 30 м		LOLADEM 60 м		SLDEM2013	
	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна	алгоритм 4 ячеек	алгоритм Хорна
Процент площади эллипса с северной (СЗ, С, СВ) экспозицией	54.10%	53.05%	52.31%	50.80%	42.20%	42.97%	51.09%	47.18%
Процент площади эллипса с восточной (В) экспозицией	13.87%	14.23%	11.83%	10.96%	13.20%	12.68%	10.44%	10.15%
Процент площади эллипса с южной (ЮВ, Ю, ЮЗ) экспозицией	20.65%	21.27%	23.99%	26.92%	31.29%	31.48%	26.76%	31.15%
Процент площади эллипса с западной (З) экспозицией	11.37%	11.45%	11.86%	11.32%	13.31%	12.86%	11.71%	11.52%

Затем нужно найти угловую высоту i-ой точки над математическим горизонтом наблюдателя (касательная плоскость к идеальной сфере в точке расположения наблюдателя). Это можно сделать, используя следующую формулу:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{r_i \cos\left(\frac{d}{R}\right) - r_0}{\sqrt{r_0^2 + r_i^2 - 2r_0 r_i \cos\left(\frac{d}{R}\right)}}\right). \qquad (3)$$

В результате каждая i-ая точка ЦМР приобретает сферические координаты (α_i, β_i) относительно наблюдателя, а знаменатель в формуле (3) характеризует кратчайшее расстояние в трехмерном пространстве от наблюдателя до данной точки $\left(L_i = \sqrt{r_0^2 + r_i^2 - 2r_0 r_i \cos\left(\frac{d}{R}\right)}\right)$.

Теперь для построения линии локального горизонта наблюдателя можно воспользоваться одним из широко используемых в машинной графике алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей. Поскольку все точки ЦМР имеют сферические координаты (α_i, β_i, L_i), то можно воспользоваться, например, алгоритмом, использующим z-буфер. z-буфер представляет собой двумерный массив, каждый элемент которого соответствует элементарному "пикселу" в пространстве параметров (α, β). Для подавляющего большинства вычислений оказалось достаточно z-буфера с дис-

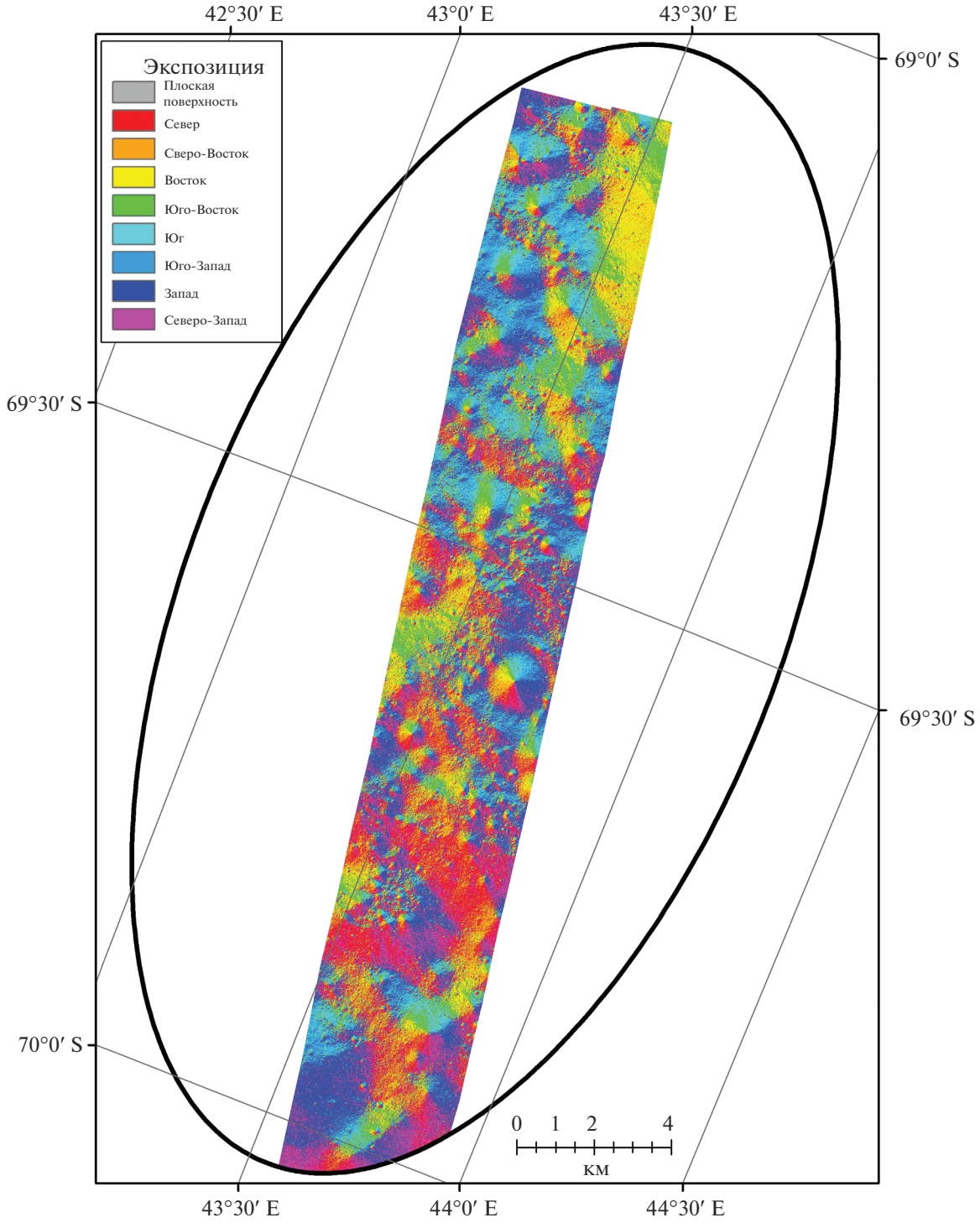


Рис. 11. Карта уклонов поверхности, рассчитанных с помощью алгоритма четырех ячеек на основе ЦМР NAC_DTM_BOGUSLAWSKY1 для выбранного основного места посадки. Карта составлена в полярной стереографической проекции с центральным меридианом 22° в.д.

кретизацией пикселей 0.125° × 0.125°. Следует отметить, что построенная таким образом линия локального горизонта оказывается заданной в пространстве топоцентрических сферических координат в системе отсчета КА.

В качестве примера были рассчитаны видимые линии горизонта для центра основного района посадки и для точек A (69.88° ю.ш., 43.80° в.д.), B (69.87° ю.ш., 43.01° в.д.), C (69.34° ю.ш., 43.83° в.д.) и D (69.15° ю.ш., 43.34° в.д.) в основном районе

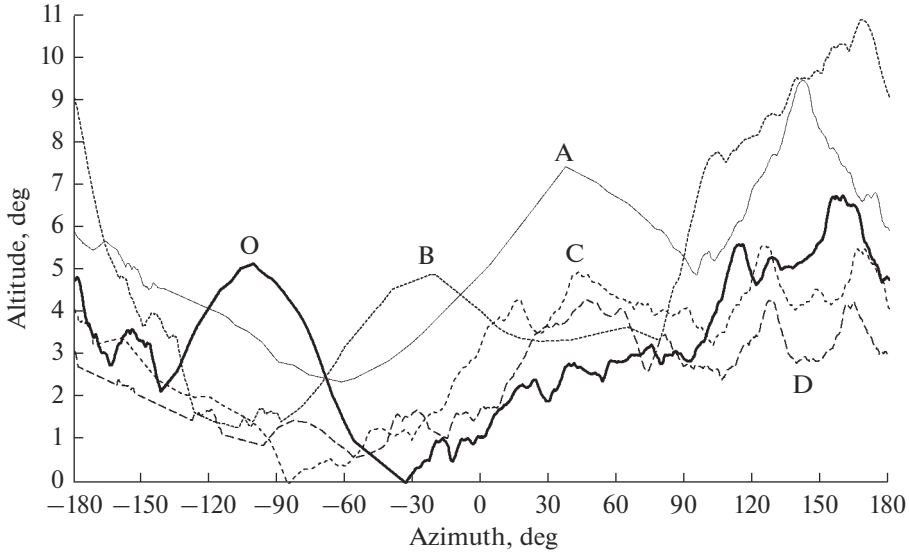


Рис. 12. Видимые линии горизонта для точек внутри основного района посадки: O – для центра основного района посадки; A – для точки с координатами 69.88° ю.ш., 43.80° в.д.; B – для точки с координатами 69.87° ю.ш., 43.01° в.д.; C – для точки с координатами 69.34° ю.ш., 43.83° в.д.; D – для точки с координатами 69.15° ю.ш., 43.34° в.д.

посадки (рис. 12). Из рисунка видно, что видимые линии горизонта в пределах основного района посадки имеют существенные отличия. Эти отличия могут быть использованы при определении местоположения КА, севшего на поверхность Луны и передавшего панораму окружающего ландшафта.

Расчет топоцентрических координат Солнца и наземных станций связи для локальных участков на лунной поверхности

После того, как построена локальная линия горизонта для КА, расположенного в некоторой точке в пределах выбранного района посадки, можно определить моменты восхода и захода Солнца и соответственно продолжительности светлых и темных периодов лунаций, которые будут накладывать ограничения на интервалы активного функционирования научных приборов на борту КА. Также можно определить периоды видимости станций космической связи на поверхности Земли, которые, пересекаясь со светлыми периодами лунаций, характеризуют возможность проведения и продолжительность сеансов радиосвязи с Землей. Светлые и темные периоды лунаций определяются топоцентрическими координатами Солнца относительно линии локального горизонта в системе координат КА. Аналогично топоцентрические координаты Земли, а точнее – каждой конкретной наземной станции космической связи – определяют возможность проведения сеансов связи.

Созданная в Лаборатории реактивного движения (JPL, NASA) библиотека функций SPICE позволяет значительно упростить и автоматизировать многократные вычисления взаимного расположения и ориентации Солнца, планет, их естественных и искусственных спутников и получать результаты с высокой степенью точности и достоверности (The SPICE concept, 2021). Библиотека SPICE имеет программные “интерфейсы” с такими распространенными языками программирования как Fortran, C/C++, IDL, MathLab. Для проведения вычислений данная библиотека нуждается в так называемых kernel-файлах, описывающих системы координат в пространстве и времени, связанные с небесными телами, космическими аппаратами и инструментами на их борту. Kernel-файлы также описывают глобальную систему координат J2000 (опорная система координат), размеры, форму, ориентацию в пространстве и вращение небесных тел, положение, скорость, ориентацию космических аппаратов и научных инструментов, правила работы с бортовыми часами различных КА и процедуру перевода времени между различными системами отсчета. Все планеты, их основные естественные спутники, Солнце, крупные астероиды и кометы, американские станции космической связи, многие КА NASA, ESA и других космических агентств имеют все необходимые для работы kernel-файлы в стандартном пакете библиотеки SPICE или могут быть свободно загружены из архива, расположенного по адресу https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/. Поскольку для российских (“Медвежьи озера”, “Байконур”, “Уссурийск” и “Евпатория”) станций космической связи не существовало необходимых kernel-файлов, они были специально созданы.

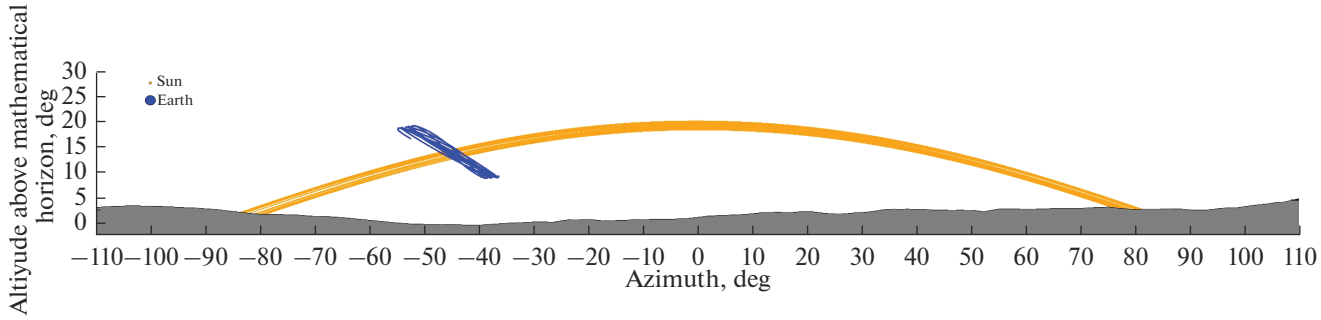


Рис. 13. Топоцентрические координаты Солнца (оранжевая линия) и центра Земли (синяя линия) относительно КА Луна-25 в выбранном основном месте посадки в интервале: с октября по декабрь 2021 г. Для сравнения в левом верхнем углу показаны угловые размеры солнечного диска и диска Земли. Локальный горизонт показан серой заливкой.

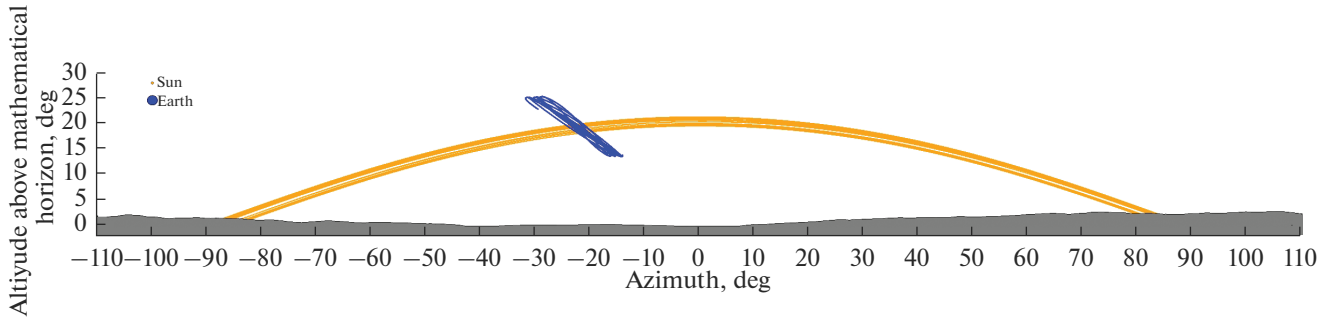


Рис. 14. Топоцентрические координаты Солнца (оранжевая линия) и центра Земли (синяя линия) относительно КА Луна-25 в запасном выбранном месте посадки в интервале: с октября по декабрь 2021 г. Для сравнения в левом верхнем углу показаны угловые размеры солнечного диска и диска Земли. Локальный горизонт показан серой заливкой.

Для основного и резервного районов посадки были описаны топоцентрические системы координат с центром в выбранной точке, направленной в зенит осью Z, перпендикулярной ей и направленной на север (к северному полюсу Луны) осью X и осью Y, образующей с ними правую декартову систему координат. Координаты центра этих систем задавались широтой и долготой выбранного места посадки в планетоцентрической системе координат Луны и высотой места над референцной идеальной сферой Луны (радиусом 1737.4 км), полученной на основе ЦМР. Аналогичным образом были описаны топоцентрические системы координат наземных российских станций космической связи относительно планетоцентрической системы координат, связанной с Землей (эллипсоид вращения с экваториальным радиусом 6378.14 км и полярным радиусом 6356.75 км). Информация обо всех описанных системах координат была преобразована в соответствующие kernel-файлы форматов SPK и FK, готовые для использования библиотекой SPICE. В результате для каждого места посадки стало возможно вычислять на любой интересующий момент времени топоцентрические координаты Солнца и наземных станций космической связи с учетом вращения Земли вокруг своей оси в системе отсчета КА.

Интервалы светлых периодов лунации и продолжительность сеансов радиосвязи для выбранных основного и запасного мест посадки

Для основного и запасного места посадки был выполнен анализ условий освещенности и максимальной продолжительности возможных сеансов связи с российскими станциями космической связи в интервалы времени, соответствующие трем лунациям после запуска КА 1 октября 2021 г.

В основном районе посадки линия локального горизонта располагается на высотах 0.1°–3.6° в интервале азимутов –90°...+90° (см. рис. 13). Это обеспечивает приемлемую продолжительность светлого периода лунаций от 12.7 до 14.0 земных суток (43.22–47.36% лунных суток). Периодическая низкая высота Луны для станции “Медвежьи озера” из-за высокой географической широты станции накладывает серьезные ограничения на продолжительность сеансов связи вплоть до полного отсутствия необходимых условий. Однако наличие других станций на более низких широтах, существенно разнесенных по долготе, позво-

ляют доводить суммарное время возможных сеансов связи до 8 ч в сутки и более.

В выбранном запасном районе посадки линия локального горизонта проходит на высоте всего –0.1°–2.7° (см. рис. 14), поэтому продолжительность светлых периодов лунаций составляет от 12.7 до 14.2 земных суток (42.97–48.21% лунных суток). Низкий локальный горизонт, относительно низкая широта и умеренная восточная долгота приводят к высокому расположению Земли над горизонтом и хорошим условиям радиосвязи с наземными станциями приема. Продолжительность сеансов радиосвязи ограничена только продолжительностью видимости Луны с наземных станций приема и составляет около 8 ч и более для всех четырех российских станций приема в совокупности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе имеющихся данных о поверхности Луны, полученных с космического аппарата LRO, был выполнен анализ районов посадки космического аппарата Луна-25, выбранных ранее на основе методов пространственного анализа.

Проведенный анализ позволил создать инженерные модели выбранных районов посадки, содержащие сведения о рельефе поверхности, о ее основных морфометрических параметрах, а также об условиях освещенности Солнцем и радиовидимости Земли. Для создания инженерных моделей использовались цифровые модели рельефа, полученные с помощью камер WAC и NAC инструмента LROC/LRO, камеры космического аппарата Kaguya, а также с помощью лазерного альтиметра LOLA/LRO. Максимальное пространственное разрешение инженерной модели, созданной для центральной части основного района посадки, достигает 2 м (около 30% района посадки) и сравнимо с размерами космического аппарата Луна-25. Максимальное пространственное разрешение для запасного района посадки достигает 30 м.

Созданные инженерные модели подтвердили безопасность посадки в выбранные районы как с точки зрения морфометрических параметров (уклонов и экспозиции), так и с точки зрения условий освещенности и радиовидимости в предполагаемый период работы космического аппарата Луна-25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дьячкова М.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса Луны // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 3. С. 204–215. (*Djachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B.* Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 3. P. 185–195.)

Barker M.K., Mazarico E., Neumann G.A., Zuber M.T., Haruyama J., Smith D.E. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera // Icarus. 2016. V. 273. P. 346–355. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.07.039

Burrough P.A., McDonnell R.A. Principles of Geographical Information Systems. N.-Y.: Oxford Univ. Press, 1998. 333 p.

Florinsky I.V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models // Intern. J. Geograph. Inform. Sci. 1998. V. 12(1). P. 47–61.

Haruyama J., Ohtake M., Matsunaga T., Otake H., Ishihara Y., Masuda K., Yokota Y., Yamamoto S. Data products of SELENE (Kaguya) Terrain Camera for future lunar missions // 45th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2014. Abstract No. 1304.

Horn B.K.P. Hill shading and the reflectance map // Proc. IEEE. 1981. V. 69(1). P. 14–47.

Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S.J., Thomas P.C., Denevi B.W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M.A., Caplinger M.A., Ghaemi F.T., Schaffner J.A., Malin M.C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T.N., Eliason E.M., McEwen A.S., Turtle E., Jolliff B.L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 81–124. https://doi.org/10.1007/s11214-010-9634-2

Scholten F., Oberst J., Matz K.-D., Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E.J., Robinson M.S. GLD100: The near-global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. E00H17. https://doi.org/10.1029/2011JE003926

Sharpnack D.A., Akin G. An algorithm for computing slope and aspect from elevations // Photogram.c Engineer. 1969. V. 35(3). P. 247–248.

Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Mazarico E., Lemoine F.G., Head J.W., Lucey P.G., Aharonson O., Robinson M.S., Sun, X., Torrence M.H., Barker M.K., Oberst J., Duxbury T.C., Mao D., Barnouin O.S., Jha K., Rowlands D.D., Goossens S., Baker D., Bauer S., Gläser P., Lemelin M., Rosenburg M., Sori M.M., Whitten J., Mcclanahan T. Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit // Icarus. 2017. V. 283. P. 70–91. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.006

The SPICE concept // URL: https://naif.jpl.nasa.gov/naif/ spiceconcept.html (дата обращения 01.06.2021).

Vondrak R., Keller J., Chin G., Garvin J. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for Lunar Exploration and Science // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 7–22. https://doi.org/10.1007/s11214-010-9631-5

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative analysis of land surface topography // Earth Surface Processes and Landforms. 1987. V. 12(1). P. 47–56.