

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Красильникова Сергея Сергеевича на тему «Эволюция слоистых грунтово-ледяных массивов в высоких широтах северного полушария Марса», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.25 –«Геоморфология и эволюционная география»

Марс исследуется с помощью космических аппаратов с 1962 г. Именно благодаря этим исследованиям нам хорошо известны формы рельефа этой планеты, ее физические характеристики, климат и сезонные изменения на ней. В настоящее время на околомарсианских орбитах работают 8 орбитальных станций и 3 марсохода. Это - американский зонд «Марс Одисей» с российским спектрометром HEND, который обнаружил подповерхностные запасы водяного льда; зонд европейского космического агентства «Марс Экспресс», запущенный российской ракетой, показал наличие подледного озера; американские аппараты «Марс разведывательный спутник» (MRO) и «Maven»; индийский аппарат «Мангальян»; спутник «Trace Gas Orbiter» (совместный проект ЕКА и России); первый китайский аппарат «Тяньвэнь 1»; первый космический аппарат объединенных арабских эмиратов «Al Amal»; на поверхности Марса с 2012 года работает тяжелый марсоход «Кьюриосити» и марсоход «InSight» с французским сейсмометром. Новый марсоход «Perseverance» («Настойчивость») в феврале этого года успешно совершил посадку в районе древнего озера. В результате многочисленных исследований с помощью космических аппаратов на Марсе обнаружены запасы поверхностного и подповерхностного льда. Основная часть северной ледяной шапки состоит из водяного льда и тонкого сезонного слоя сухого льда (твердого углекислого газа).

Диссертация Красильникова С.С. посвящена актуальной теме эволюции северной полярной шапки Марса. Автор исследует гипотезу о генетической связи околополярных ледяных массивов и полярной шапки. Определение объема поверхностного и погребенного льда, максимально возможного смещения границ северной полярной шапки в течение последних нескольких миллионов лет в результате изменения климата и изменения положения оси вращения Марса позволили Красильникову С.С. прийти к заключению о том, что останцы полярной шапки являются палеограницами древней шапки.

Целью работы является реконструкция эволюции современной северной полярной шапки Марса. При этом выделено пять задач: 1- разработка классификации ледяных массивов, 2 - выявление общих характеристик между ледяными слоистыми отложениями и полярной шапкой, 3 - оценка мощности ледяных массивов, 4 - морфологический анализ современных и древних форм гляциального и криогенного происхождения, 5 - реконструкция смещения границ полярной шапки и обособленных ледяных массивов.

Объектом исследования является лед в северной полярной области Марса.

Предметом исследования – эволюция ледяного покрова в северных широтах Марса за последние пять миллионов лет.

Защищаемые положения. К защите представлены 4 положения:

1. Останцовые ледяные массивы в высоких северных широтах Марса разделяются на пять морфологических подтипов.
2. Останцовые массивы и отложения полярной шапки имеют схожий состав и физические характеристики, состоят из льда с незначительной примесью пылевого силикатного материала.
3. Анализируемые уступы полярной шапки, выходящие на поверхность в области Olympia Undae, и лопастевидные мореноподобные гряды, образовавшиеся за счет дальнепробежной ледово-каменной лавины или быстрого сёрджа, являются палеогляциальными формами рельефа, связанными с распространением полярной шапки на более низкие широты.
4. Границы полярной шапки и ареал распространения ледяных массивов неоднократно смещались на более низкие широты.

Научная новизна работы по мнению соискателя состоит в следующем:

В диссертации впервые был выполнен комплексный анализ слоистых ледяных массивов, расположенных в диапазоне 70° - 83° северной широты.

Впервые выполнен послойный анализ спектральных данных по массивам. Построены карты распространения льда с использованием новых данных спектрометров CRISM и OMEGA.

Проведена оценка объемов поверхностного и погребенного льда, содержащихся в обособленных массивах.

Предложена модель генетической связи слоистых ледяных массивов, расположенных на равнинах в диапазоне 70° - 83° с.ш. и отложений полярных шапок.

Теоретическая и практическая значимость работы.

По мнению автора разработанная модель накопления и сохранения слоистых ледяных массивов и их связь с полярной шапкой дает более полное представление о климатических изменениях на Марсе. Карта пространственного распространения ледяных массивов, составленная автором, позволяет проследить процессы конденсации/сублимации воды на поверхности северных равнин. Модель эволюции северной полярной области позволяет более точно определять возраст геологических процессов в этом регионе. Оценки объема поверхностного и погребенного льда могут быть использованы при выборе мест посадок будущих миссий на Марс.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, приложения и списка литературы из 258 источников. Общий объем диссертации составляет 151 страницу, 58 рисунков и 11 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели, задачи и выносимые на защиту положения, отражается научная новизна и практическая значимость, достоверность результатов и личный вклад автора.

В первой главе диссертации кратко рассматривается современное состояние исследований поверхности Марса, используемые физические параметры и методы анализа данных космических аппаратов. Эволюция северной полярной шапки рассматривается отдельно. Отмечено, что слоистые ледяные массивы, располагающиеся вокруг северной полярной шапки на широтах 70° - 83° подробно не исследовались ранее.

Вторая глава преимущественно посвящена анализу пространственного распределения ледяных массивов в пределах северных равнин, их типизации, морфологическому и структурному анализу. На основе анализа данных видимого диапазона съемочных систем Mars Orbiter Camera, Context Camera и камеры HiRISE автором составлена карта распространения ледяных массивов слоистых отложений. При этом останцовые массивы разделены на подтипы в зависимости от положения в рельефе: массивы, расположенные на равнине; массивы полностью или частично перекрывающие валы кратеров; массивы, расположенные на дне и на внешних теневых склонах кратеров; массивы, расположенные на дне кратеров. Отмечается широтная зональность для исследуемых ледяных массивов, связанная с увеличением солнечной радиации на поверхность равнин при движении с севера на юг. Особо выделена краевая зона NPLD, для которой характерна малая мощность отложений слоистого льда /изморози и сильное влияние эрозии, связанной с сублимацией и ветровой эрозией.

В третьей главе представлены результаты анализа спектральных данных различных съемочных систем с целью определения физических и химических особенностей ледяных массивов в сравнении с отложениями полярной шапки. На основе данных спектрометра OMEGA проведено сравнение спектров ледяных массивов со спектрами NPLD. Для более детального анализа состава ледяных массивов использовались данные спектрометра CRISM. Снимки высокого разрешения использовались для анализа вариаций состава слоистых отложений ледяных массивов и их послойного анализа. Температура и излучательная способность поверхности получена при помощи данных спектроскопии камеры THEMIS. Для анализа ледяных массивов и слоистых отложений составлена мозаика мультиспектральных снимков OMEGA. Результаты определения вещественного состава ледяных массивов получены при помощи спектрометра CRISM. В ИК диапазоне было обнаружено усиление спектра магнезиально-железистого пироксена и оливина. Также было выявлено наличие высококальциевого пироксена в некоторых ледяных слоях и гидратированных сульфатов в слоях с высокой концентрацией льда. Используя алгоритмы обработки снимков в ИК диапазоне удалось выяснить, что температура поверхности ледяных массивов ($\sim 195\text{--}200\text{K}$) соответствует температуре поверхности полярной шапки. В результате проанализировав данные по структурной слоистости, рассмотрев стадии накопления материала, изучив состав и некоторые физические свойства ледяных массивов, автором сделан вывод о генетической связи ледяных массивов и отложений полярной шапки.

В четвертой главе выполнен расчет объемов поверхностного и погребенного слоистого льда вокруг северной полярной шапки. Автором разработана методика определения мощности и объемов ледяных массивов, расположенных внутри кратеров с использованием данных лазерной альтиметрии и геометрического анализа формы кратеров по данным MOLA. Для определения объема поверхностных и погребенных слоистых ледяных отложений проанализированы данные SHARAD в области Olympia Mensa. Мощность отложений основного массива достигает 230 метров. Объем поверхностного и погребенного слоистого льда (в секторе $90^\circ - 160^\circ$ в.д. и $70^\circ - 83^\circ$ с.ш.) составил 6740 км^3 с максимальной мощностью отложений 420 м. Обработка радарных данных показала, что мощность ледяных отложений в пределах уступов полярной шапки в области Olympia Undae составляет 50 м и 70 м. Предполагается, что данные уступы являются реликтовыми уступами полярной шапки.

Пятая глава посвящена эволюции северной полярной шапки Марса и палеогляциальным формам рельефа, к которым отнесены овраги и промоины, сформированные тальми водами, полигональный рельеф, бугры пучения, кратеры на пьедестале. За последние 20 млн. лет угол наклона оси вращения планеты менялся от 0° до 45° , что привело к значительным изменениям в криосфере планеты. Автором изучены массивы, расположенные вокруг полярной шапки на широтах 70° - 83° с.ш., формирование и сохранение которых могло происходить только при наклоне оси вращения менее 35° . Серии лопастевидных мореноподобных гряд, обнаруженные автором на трех участках позволили предположить, что формирование гряд связано с чрезмерным накоплением льда на наклонной поверхности и сходом дальнепробежной ледокаменной лавины или быстрого сёрджа. Выдвинута гипотеза об образовании гряд в результате схода лавины, моделирование которой было произведено в диссертации. Формирование ледяных массивов на исследуемых широтах могло происходить в период распространения северной полярной шапки на более низкие широты. Автором выполнена оценка временного отрезка, в течение которого наблюдалось смещение границы полярной шапки на более низкие широты. Гляциальные и криогенные формы рельефа, образованные в период (1,3- 2,1 млн. лет) перекрывались более молодыми образованиями в период (0,37 – 1,3 млн. лет). В период (2,1 - 2,8 млн. лет) и в настоящее время (0 – 0,37 млн. лет) происходило и происходит постепенное накопление льда в пределах полярной шапки и в наиболее благоприятных для этого местах с метеорологической и орографической точек зрения.

Основные выводы приведены в заключение диссертации.

Приложение к работе содержит таблицы: 1- используемых сокращений, 2 - методики дешифрирования, 3 -перечисленных снимков и данных, используемых в работе, 4 - координат и диаметров типов ледяных массивов и многолетнего покрова изморози, приуроченных к кратерам, 5- положения и площади ледяных массивов, перекрывающих подстилающую поверхность на равнине, и ледяных массивов перекрытых эоловыми отложениями, 6 – выделяемых типов останцовых массивов. В приложении 7 приведена мозаика панхроматических снимков МОС. Сочетание спектральных каналов для определения состава поверхности дано в приложении 8. Расчет объема ледяных массивов в кратерах показан в приложении 9.

Диссертация Красильникова С.С. выполнена на высоком профессиональном уровне, написана грамотным языком. В работе много хорошо оформленных карт, составленных на основе анализа данных камер космических аппаратов МРО и Марс Экспресс.

Результаты работы доложены на российских и международных конференциях, опубликованы в четырех рецензируемых изданиях.

Замечания и вопросы к автору диссертации.

1. В краткой истории исследования Марса автор справедливо пишет, что современный период исследования начинается с появления космических аппаратов и посадочных модулей, не упомянув при этом запущенный в СССР в 1962 г. зонд «Марс-1» - первый в истории космический аппарат, выведенный на траекторию полёта к Марсу. Не ясно, почему этот обзор заканчивается американским аппаратом «Mars Reconnaissance Orbiter», запущенным в 2005 г. Получилась очень краткая история исследования Марса.
2. В таблице 1.3.1 «Эпохи геологической истории Марса» приведены данные 2001 года, в которых Ранняя Ноахидская (может быть Ноахийская ?) эпоха заканчивается ~ 4,0 млрд. лет назад. В современной литературе период аккреции и дифференциации планеты датируется 4,5 млрд. лет.
3. На странице 21 не указано о каких высотах вулканов идет речь . Абсолютная высота вулкана Гора Олимп составляет 21,2 км, а относительная высота 26 км .
4. В таблице 1.3.1_1 лучше привести современные данные: например длина года на Марсе составляет 687 суток, а не 668,98 суток.
5. На карте рис. 1.4.2._1 и других подобных картах названия форм рельефа даны на латинском языке. Надо пояснить хотя бы некоторые из них, например Olympia Mensae, Olympia Undae, Olympia Planum, Olympia Cavi. На рис.4.2.2_2 дано название Olympia Mensa (столовая гора Олимп) вместо Olympia Mensae (столовые горы Олимп).
6. Вряд ли стоит использовать формулу 22 (стр. 71) зависимости глубины кратера от его диаметра, если автор вычислял далее усредненный профиль через центр кратера по данным MOLA. Кратеры в области полярной шапки не являются простыми, для которых приводится формула 22.

Указанные замечания не снижают значимости диссертационного исследования.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.25 – «Геоморфология и эволюционная география» (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Красильников Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.25 - «Геоморфология и эволюционная география».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела исследования Луны и планет Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга, МГУ имени М.В. Ломоносова

РОДИОНОВА Жанна Федоровна



4 марта 2021 г.

Контактные данные:

Рабочий e-mail: marss8@mail.ru

Рабочий телефон: +7(495)-939-10-29

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.03.01 – «Астрометрия и небесная механика»

Адрес места работы:

119992, Россия, г. Москва, Университетский пр., 13, Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга, МГУ имени М.В. Ломоносова, Отдел исследования Луны и планет

тел. +7-(495)-939-20-46

e-mail организации: www.sai.msu.ru

Web-сайт организации: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника ГАИШ МГУ Родионовой Ж.Ф. удостоверяю

Заместитель директора ГАИШ

Сильченко О.К.



4 марта 2021 г