

**СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА
НАД БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ В ДЕКАБРЕ 2020 г.****COMPARING METHODS TO ESTIMATE CLOUD COVER OVER
THE BAIKAL NATURAL TERRITORY IN DECEMBER 2020****С.В. Подлесный** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, step8907@mail.ru***Е.В. Девятова** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, devyatova@iszf.irk.ru***А.В. Саункин** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, saunkin@inbox.ru***Р.В. Васильев** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия***S.V. Podlesnyi***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, step8907@mail.ru***E.V. Devyatova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, devyatova@iszf.irk.ru***A.V. Saunkin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, saunkin@inbox.ru***R.V. Vasilyev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, roman_vasilyev@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia*

Аннотация. В работе рассматривается вопрос о том, насколько сведения об облачном покрове, полученные при помощи спутниковых и модельно-интерполяционных методов, пригодны для мониторинга прозрачности атмосферы и определения условий наблюдения свечения верхней атмосферы Земли в конкретной наземной обсерватории. Для этой цели было проведено сравнение временной динамики локального облачного покрова по данным проекта ECMWF ERA5 и спутников NOAA, с прозрачностью ночной атмосферы, полученной при помощи цифровой фотокамеры. Динамика исследуемых характеристик рассматривалась в течение декабря 2020 г. для Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики, расположенной на Байкальской природной территории вблизи с. Торы (Бурятия, РФ). Результаты сравнительного анализа показали в целом хорошее согласие данных архива ECMWF ERA5 и облачности, наблюдаемой при помощи камеры. Недостатками являются отсутствие в архиве информации о быстрых вариациях облачности, а также положительные и отрицательные задержки в динамике облачных полей длительностью около двух часов. Вследствие нерегулярности и большой дискретности спутниковых данных и сложности определения облачности в темное время суток, уверенных выводов о применимости спутниковых данных сделать не удалось.

Ключевые слова: облачный покров, прозрачность атмосферы, реанализ ECMWF ERA5, спутниковые наблюдения.

Abstract. The paper addresses the issue of how much cloud cover data obtained using satellite and model-interpolation techniques are suitable for monitoring the transparency of the atmosphere and determining conditions for airglow observations at a local geophysical observatory. For this purpose, we compared the temporal dynamics of cloud cover from ECMWF's ERA5 reanalysis and NOAA satellites with the night atmosphere transparency according to a digital camera. We considered the dynamics of the addressed parameters at the Geophysical Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics, located in the Baikal Natural Territory near the village of Tory (Republic of Buryatia, Russia), during December 2020. The comparative analysis showed a generally good agreement between cloud cover data from ECMWF's ERA5 climate reanalysis and those observed with the camera. Disadvantages are the lack of information on rapid variations in cloud cover in the reanalysis and positive and negative delays in the dynamics of cloud fields that last about two hours. Due to irregular satellite data, large time gaps between passes and difficulties in estimating cloud cover at night, we could not come to reliable conclusions concerning the applicability of satellite data.

Keywords: cloud cover, atmospheric transparency, ECMWF's ERA5 reanalysis, satellite observations.

ВВЕДЕНИЕ

На юге Восточной Сибири расположены обсерватории Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ

СО РАН), оснащенные оборудованием для исследования околоземного космического пространства, а также ближнего и дальнего космоса в оптическом диапазоне. Оптическое излучение, проходя сквозь атмосферу, подвергается различным искажениям на ее

неоднородностях, что сказывается на качестве как астрономических данных (дрожание изображения звезд, качество дифракционной картины изображений звезд, деформация края изображения Солнца), так и данных наблюдений собственного свечения атмосферы. Важными факторами, влияющими на качество оптических наблюдений, являются фаза лунного цикла и метеорологические условия. Основной метеорологической характеристикой, определяющей результативность оптических наблюдений, является количество ясных безоблачных дней или ночей за определенный период времени, или, иначе говоря, повторяемость ясного неба [Дарчия, 1985], в пункте наблюдений. Заметим также, что влияние на условия наблюдений могут оказывать некоторые локальные метеорологические факторы (частота туманов при ясном небе в данной местности, например). Кроме того, на качество оптических наблюдений большое влияние оказывают антропогенные факторы: прямой и рассеянный свет от различных источников освещения, смог, мгла, дымка и пыль. От влияния антропогенных факторов можно избавиться вынесением точки наблюдений на достаточное расстояние от населенных пунктов и промышленных зон. Влияние процессов в атмосферной толще можно учесть, предварительно проведя длительные наблюдения погодных условий в предполагаемой точке наблюдений. Так, изучению повторяемости ясного неба и других астроклиматических характеристик на территории СССР посвящена монография Дарчии Ш.П. [Дарчия, 1985], в которой он обосновывает выбор южных районов Восточной Сибири для строительства оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН (тогда СибИЗМИР).

Крупномасштабная циркуляция и погодные условия меняются со временем. Для нас представляют интерес мониторинг прозрачности атмосферы и изучение климатической изменчивости основных метеорологических характеристик, имеющих прямое отношение к повторяемости ясного неба и прозрачности атмосферы в местах размещения оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН. Это важно для диагностики основных закономерностей изменчивости условий наблюдения собственного свечения верхней атмосферы и оценки их возможных будущих изменений. Основной характеристикой, имеющей непосредственное отношение к повторяемости ясного неба и в значительной мере определяющей условия оптических наблюдений, является облачность.

Большой проблемой является выбор данных для исследования. В глобальных масштабах эту проблему отлично решают проекты реанализа, в которых представлена информация о различных метеорологических характеристиках на разных высотах атмосферы в узлах регулярной сетки с различным временным разрешением за период нескольких десятилетий. Так, в работе [Шиховцев и др., 2020] приводятся результаты использования данных проектов реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis, ECMWF ERA-40 и ERA-Interim) для анализа метеорологических и оптических характеристик атмосферы в месте расположения Саянской солнечной обсерватории (ССО ИСЗФ СО РАН). Мы используем в своей работе

проект ERA5 [Hersbach et al., 2020] Европейского центра по среднесрочным прогнозам погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [<https://www.ecmwf.int>]). ECMWF ERA5 является реанализом пятого поколения для исследования глобальной погоды и климата за последние несколько десятилетий. Крупномасштабная облачность в проекте ERA5, как и в других реанализах, является расчетной характеристикой. Представление крупномасштабной облачности и осадков в этом проекте основано на схеме, предложенной Tiedtke [1993], которая была впоследствии обновлена. В обновленной схеме были улучшены воспроизведение смешанной облачности [Forbes, Ahlgrimm, 2014] и представление прогностических переменных для дождя и снега [Forbes, Tompkins, 2011; Forbes et al., 2011], а также параметризация микрофизики облаков [Ahlgrimm, Forbes, 2014]. Кроме того, были произведены улучшения в схеме параметризации конвекции [Tiedtke, 1989] и в ряде других схем, имеющих отношение к воспроизведению облачного покрова.

Еще одним вариантом данных об облачном покрове являются спутниковые наблюдения. В настоящее время существует и активно используется больше десятка глобальных баз данных по облачности, основанных на спутниковых наблюдениях. На данный момент опубликован ряд работ, посвященных сравнению данных наземных наблюдений облачности со спутниковыми данными и результатами реанализа. Например, в работе [Qinglong You et al., 2014] сравнивается облачный покров, полученный с помощью реанализов NCEP/NCAR и ECMWF ERA-40, с данными наземных наблюдений для Тибетского плато. А в работе [Lei et al., 2020] для Тибетского плато и Китая приводятся результаты сравнения облачного покрова, полученного по спутниковым данным, с облачным покровом, восстановленным с использованием реанализов ECMWF ERA5 и ERA-Interim.

Для того чтобы оценить достоверность данных реанализа и спутников в применении к интересующей нас обсерватории, необходимо сравнить их с данными наземных наблюдений. К сожалению, данные регулярных метеорологических наблюдений для обсерваторий ИСЗФ СО РАН отсутствуют, поэтому мы можем рассчитывать только на сопоставление косвенных данных. В этой работе мы сравниваем общую облачность по данным спутников Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) и реанализа ECMWF ERA5 с данными о прозрачности ночной атмосферы, полученными с помощью широкоугольной цифровой фотокамеры ФИЛИН-1Ц, установленной в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (с. Торы, Республика Бурятия, РФ). Заметим, что камера не предназначена специально для слежения за облачностью, но может быть успешно приспособлена к решению этой задачи. Техника оценки прозрачности атмосферы и состояния облачного покрова с помощью камеры ФИЛИН-1Ц описана ниже. Мы не первые, кто приспособливает данные наблюдений цифровой камеры к определению облачности. В работе [Загайнова, Караваев, 2013] можно ознакомиться с методом автоматического определения балла облачности

по изображениям, получаемым в видимом диапазоне камерой полного неба, установленной на территории ССО ИСЗФ СО РАН.

Цель настоящей работы — выяснить, насколько реанализ ECMWF ERA5 и спутниковые данные пригодны как средство мониторинга прозрачности зимней ночной атмосферы и облачности в конкретной наземной оптической обсерватории (Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН, Россия).

ПРИБОРЫ И ДАННЫЕ

На рис. 1 изображено взаимное расположение Геофизической обсерватории, четырех узлов сетки ERA5 и областей, в которых определялась облачность по спутниковым данным и данным ФИЛИН-1Ц. Узлам сетки ERA5 соответствуют красные точки: s-w (51.75° N, 103.00° E), n-w (52.00° N, 103.00° E), s-e (51.75° N, 103.25° E) и n-e (52.00° N, 103.25° E). Спутниковые изображения ограничены областью 51.37°–51.59° N по широте и 102.46°–103.22° E по долготе, показанной синим цветом. Сиреневым цветом обозначен угол обзора камеры ФИЛИН-1Ц, расположенной в точке с координатами 51.81° N, 103.07° E. Для исследования мы брали среднее значение между узлами сетки ERA5, что соответствует координатам точки mean 51.87° N, 103.12° E на рис. 1.

Широкоугольная фотокамера ФИЛИН-1Ц (FILIN-1C)

Для определения прозрачности атмосферы и состояния облачного покрова нередко применяют устройства на основе фотоприемников. Например, в работах [Здор, Колинько, 2011; Казаковцев, Колинько, 2019; Кокарев и др., 2019] авторы выделяют свободные от облаков зоны неба и зоны облачности, используя плотность звезд на изображении с фотоприемника.

Широкоугольная фотокамера ФИЛИН-1Ц предназначена для регистрации собственного излучения ночной атмосферы и его пространственно-временных вариаций, изучения естественных и искусственных космических объектов (метеоров, космических аппаратов), контроля прозрачности атмосферы, а также решения некоторых других задач. В качестве регистрирующего устройства в аппарате используется

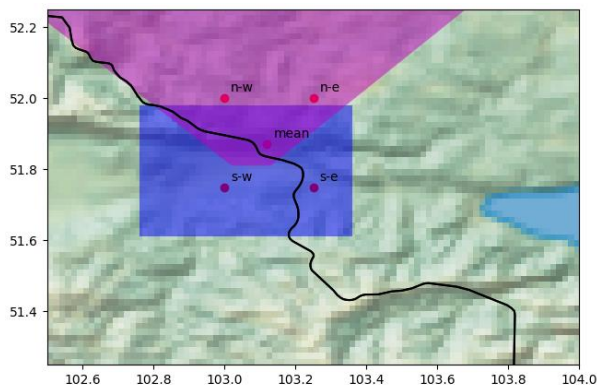


Рис. 1. Схема расположения четырех ближайших к Геофизической обсерватории узлов сетки ERA5 и «средней» точки mean (красный цвет), области сбора спутниковых данных (синий цвет) и угла обзора камеры ФИЛИН-1Ц (сиреневый цвет)

ПЗС-камера «Видеоскан 11002/О/П/2001» на основе ПЗС-матрицы KODAK KAI-11002. Основные параметры ПЗС-камеры: разрешение снимка — 4008×2672 пикселей, размер пикселя — 9×9 мкм. Для обеспечения световой загрузки всех пикселей матрицы, превышающей уровень шума, время экспозиции было выбрано 300 с [Михалев и др., 2016].

Для контроля прозрачности атмосферы используется количество звезд, попадающих в поле зрения камеры. Изображения звезд характеризуются яркостью с сильными пространственными градиентами, значительно превышающими яркость и градиенты яркости фонового свечения ночного неба, что дает возможность подсчитать видимые на изображении звезды, выделив их как области изображения с повышенной интенсивностью по отношению к окружающему фону. При изменениях прозрачности атмосферы в результате появления облачности, дымки или тумана яркость звезд падает, градиенты интенсивности ослабевают и изображения звезд начинают сливаться с фоном. Таким образом, можно разработать алгоритм обработки изображения ночного неба, который по некоторой пороговой величине яркости будет выделять связанные группы пикселей (области), количество которых будет с некоторой точностью равно количеству звезд в поле зрения камеры.

Для проведения описанной обработки изображения сначала следует избавиться от шумов, эффектов виньетирования и повысить контрастность. Под шумами в данном случае подразумеваются горячие пиксели матрицы, которые устраняются посредством медианного фильтра с прямоугольным ядром площадью 3×3 пикселя. Далее интенсивность по изображению выравнивается умножением интенсивности каждого пикселя на соответствующий выравнивающий коэффициент для снижения эффекта виньетирования от широкоугольного объектива. Матрица выравнивающих коэффициентов определяется по калибровочным изображениям равномерной яркости. Затем увеличивается контрастность изображения и определяется порог, по которому полученное изображение переводится в бинарный вид для разбиения на области. В эти области входят как звезды, так и другие объекты, обладающие значимыми градиентами интенсивности и прошедшие первичную фильтрацию вышеописанными процедурами. Области, не являющиеся звездами, устраняются пороговой селекцией по площади области. Алгоритм поиска площадей реализован с использованием библиотеки `scipy.ndimage.measurements.label` [arXiv:1907.10121 [cs.MS]]. В среднем на полученном ФИЛИН-1Ц кадре с изображением ясного безлунного неба присутствует около четырех тысяч звезд. Снижение общего количества видимых звезд означает снижение прозрачности атмосферы. Критерий облачности K_c , который по сути является степенью покрытия поля зрения камеры облаками, по данным с камеры мы рассчитывали по формуле:

$$K_c = ((\max N_s - N_s) / \max N_s) \cdot 100 \%,$$

где N_s — количество звезд на текущем кадре, а $\max N_s$ — это максимальное количество звезд на одном кадре в течение всего рассматриваемого периода наблюдений.

Проект реанализа ECMWF ERA5

Из проекта реанализа ECMWF ERA5 [Hersbach et al., 2020] мы взяли данные по общей облачности (общий облачный покров, total cloud cover). Total cloud cover (TCC) представляет собой долю покрытия облачностью трехмерной сетки. TCC — это одноуровневое поле, рассчитываемое на основе облачности, возникающей на разных модельных уровнях атмосферы, с учетом предположений о степени перекрытия/случайности облаков на разной высоте. Доли облачности варьируются от 0 до 1.

Данные представлены с почасовым временным разрешением на горизонтальной сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ за период с 1979 г. по настоящее время. Мы использовали данные для декабря 2020 г. в четырех узлах сетки, ближайших к местоположению Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (рис. 1).

Спутниковые данные

В данной работе для определения облачного покрова использовались снимки спутников NOAA-18 и NOAA-19. Алгоритм определения облачного покрова по многоспектральным измерениям яркости прибором Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) на борту полярно-орбитальных спутников NOAA описан в работе [Stowe et al., 1999]. В нашей работе мы пользовались именно этим алгоритмом. Снимки земной поверхности для оценки облачного покрова получены с помощью аппаратно-программного комплекса «Алиса-СК™», который предназначен для приема и обработки информации, передаваемой с полярно-орбитальных искусственных спутников Земли в диапазоне 1.7 ГГц. Комплекс «Алиса-СК™» разработан и обслуживается компанией «Инженерно-технологический центр “СканЭкс”» [<https://www.scanex.ru>]. Пример полученных с помощью «Алиса-СК™» снимков с маской облачности для исследуемой территории приведен на рис. 2. Процент облачности определяется как отношение пикселей, занятых облачностью, к полному количеству пикселей маски. Полученный временной ряд облачного покрова состоит из редких и неэквидистантных значений, поскольку мы используем данные полярно-орбитальных спутников, которые пролетают над интересующей нас областью нерегулярно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены графики K_c по данным камеры ФИЛИН-1Ц (синий цвет), а также облачного покрова по данным спутников NOAA (красные точки) и реанализа ERA5 (зеленый цвет) в декабре 2020 г. Для удобства анализа декабрь разбит по декадам.

На рис. 3 видны достоинства и недостатки каждого из трех наборов данных, а именно:

- 1) данные камеры ФИЛИН-1Ц представлены с хорошим временным разрешением (5 мин), но только для темного времени суток;
- 2) данные ERA5 непрерывны, но имеют временную дискретность 1 ч;
- 3) спутниковые данные NOAA нерегулярны во времени.

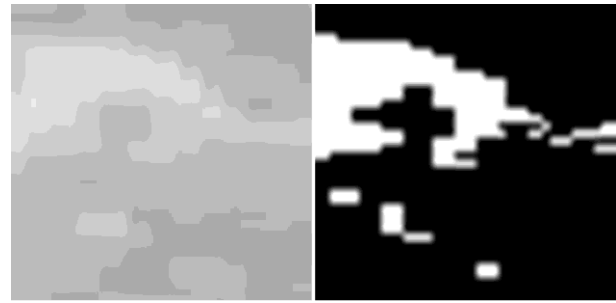


Рис. 2. Снимок с маской облачности для исследуемой территории, полученный с помощью «Алиса-СК™» (слева), и маска облачности, полученная при обработке (справа)

Рисунок 3 показывает основные особенности взаимной динамики трех наборов данных:

1. Наличие временных сдвигов между данными ERA5 и ФИЛИН-1Ц в отдельные ночи: 07.12.2020, 08.12.2020, 10.12.2020, 14.12.2020, 22.12.2020, 23.12.2020 и 24.12.2020. В качестве примеров на рис. 4 приведены графики для 08.12.2020 и 23.12.2020.

2. Слабое воспроизведение в данных ERA5 относительно быстрых изменений облачного покрова, которые хорошо видны в данных ФИЛИН-1Ц. Ниже, на рис. 5, приведены графики для ночи 21.12.2020, демонстрирующие эту особенность: в период около 19:00 UTC в данных камеры ФИЛИН-1Ц имеется ярко выраженный минимум K_c , отсутствующий в данных ERA5. Подробный анализ исходных изображений камеры показал, что эта особенность обусловлена кратковременными, длительностью в несколько кадров, прояснениями (отсутствием облачности) в радиусе действия камеры.

3. Слабое соответствие между облачностью по спутниковым данным и по данным ERA5 и ФИЛИН-1Ц, особенно в ночное время. Вероятно, это связано со сложностью определения облачности в темное время суток в зимний период. В основном для определения маски облачности по спутниковым данным используются два параметра — альbedo и разница температур. К сожалению, в применяемом нами алгоритме получения маски облачности невозможно использовать параметр альbedo из-за отсутствия подсветки солнцем. К тому же разница температур между облачностью и подстилающей поверхностью вариативна. Данные условия приводят к снижению качества работы алгоритма и к необходимости поиска коэффициентов для улучшения качества выделения маски облачности. Различие между спутниковыми данными и данными ФИЛИН-1Ц и ERA5 иллюстрируют графики для ночей 16.12.2020 и 24.12.2020 на рис. 6. Мы попробовали изменить параметры выделения маски облачности для этих ночей (нижние панели на рис. 6). Видно улучшение качества выделения облачности во время сплошной облачности там, где ранее она не определялась. В то же время растет и процент облачности, выделяемой маской, в периоды с невысокими либо нулевыми значениями количества облаков по данным ERA5 и ФИЛИН-1Ц, что приводит к завышению ее показателей (крайние правые точки (после 22:00)). Это показывает, что применение одних и тех же параметров выделения маски облачности для различных условий освещения (в дневное и в ночное время) не вполне

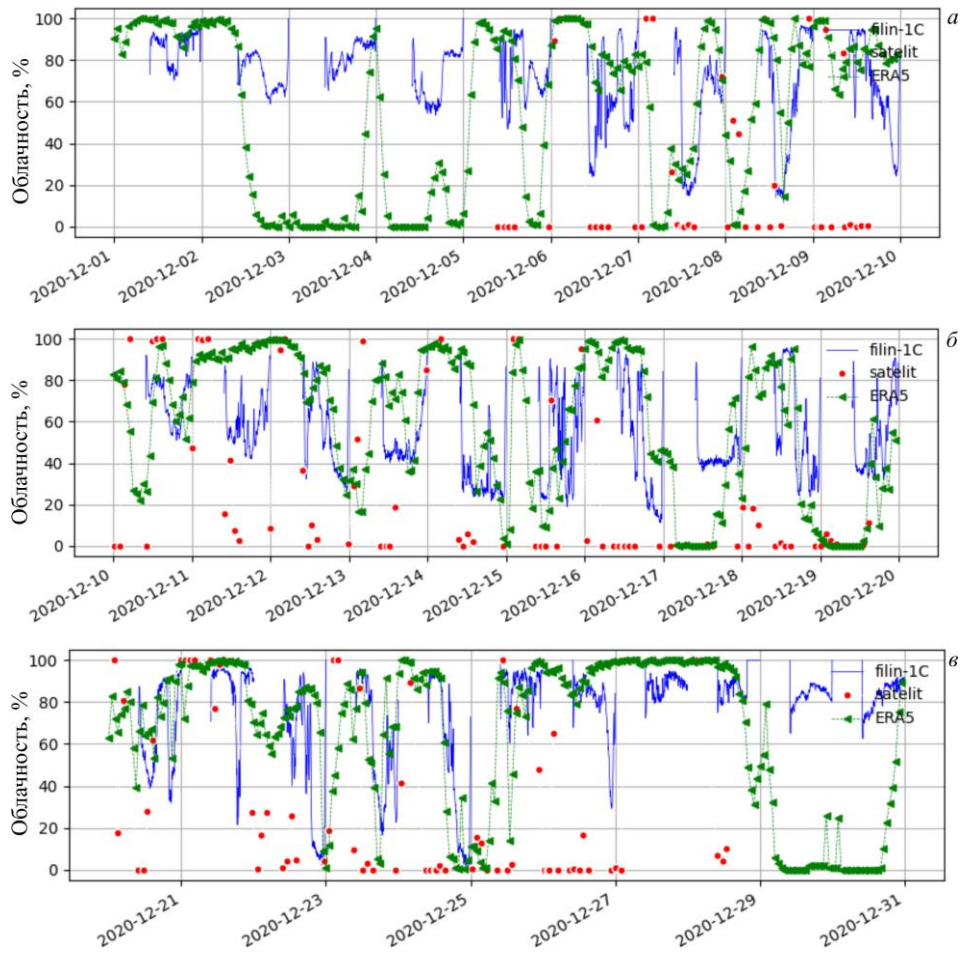


Рис. 3. Графики K_c (синий цвет), облачности по спутниковым данным (красные точки) и TCC ERA5 (зеленый цвет): с 1 по 9 (а), с 10 по 19 (б) и с 20 по 31 декабря 2020 г. (в)

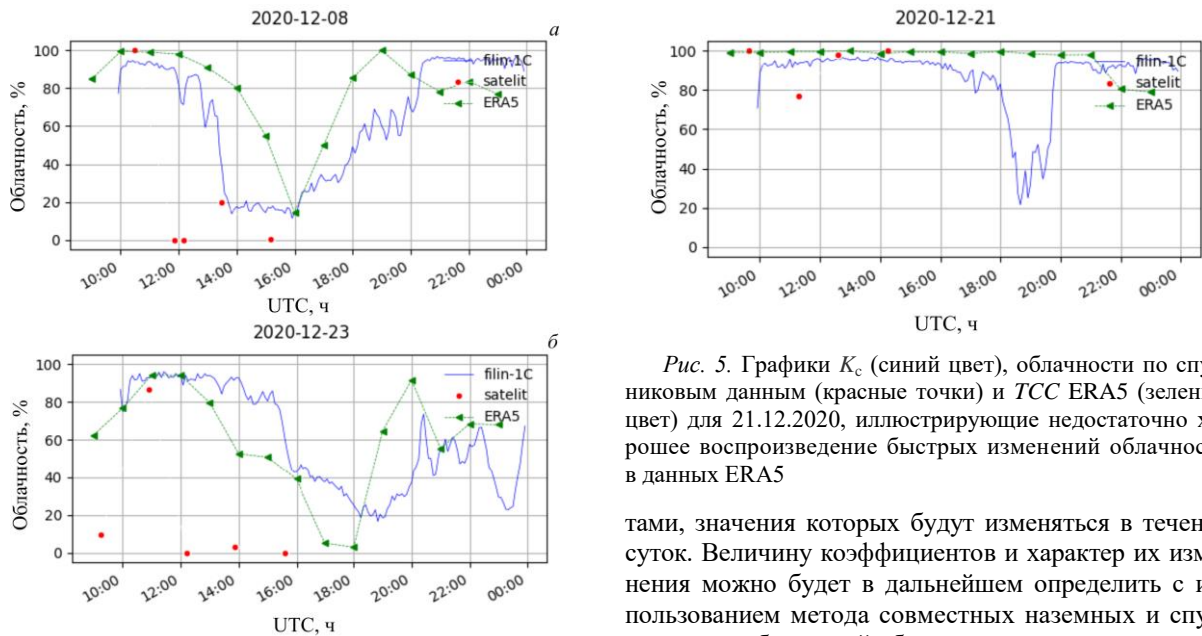


Рис. 4. Графики K_c (синий цвет), облачности по спутниковым данным (красные точки) и TCC ERA5 (зеленый цвет) для 08.12.2020 (а) и 23.12.2020 (б), иллюстрирующие наличие временных сдвигов между данными ERA5 и ФИЛИН-1Ц

корректно. По всей видимости, для определения облачного покрова следует пользоваться коэффициен-

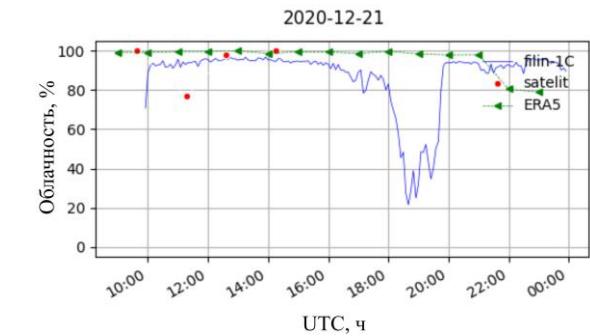


Рис. 5. Графики K_c (синий цвет), облачности по спутниковым данным (красные точки) и TCC ERA5 (зеленый цвет) для 21.12.2020, иллюстрирующие недостаточно хорошее воспроизведение быстрых изменений облачности в данных ERA5

тами, значения которых будут изменяться в течение суток. Величину коэффициентов и характер их изменения можно будет в дальнейшем определить с использованием метода совместных наземных и спутниковых наблюдений облачности.

4. В начале и конце месяца нас заинтересовали несколько ночей с явным несоответствием данных K_c и ERA5, а именно со слишком высокими значениями K_c при низких значениях облачности (2–5 и 29, 30 декабря). На рис. 7 показаны графики для 02.12.2020 и 29.12.2020, демонстрирующие эту особенность. Причинами несоответствия данных оказа-

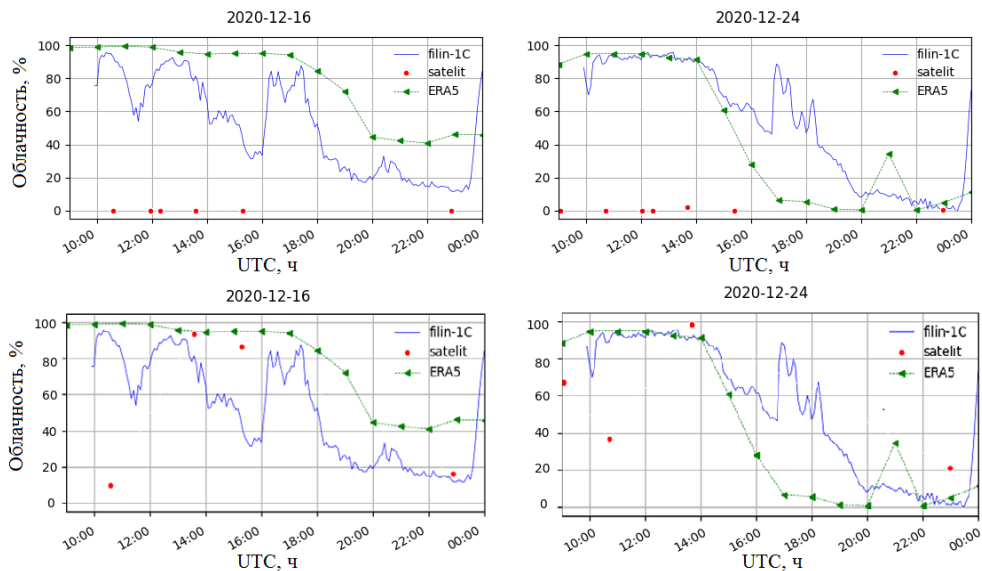


Рис. 6. Графики K_c (синий цвет), облачности по спутниковым данным (красные точки) и TCC ERA5 (зеленый цвет) для 16.12.2020 и 24.12.2020, иллюстрирующие слабое соответствие между облачностью по спутниковым данным и облачностью по данным ERA5 и ФИЛИН-1Ц (верхние панели) и улучшение соответствия после изменения параметров маски облачности (нижние панели)

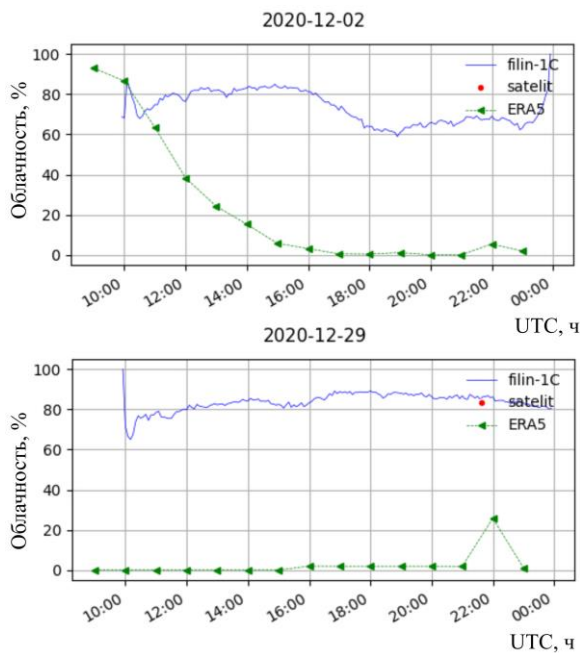


Рис. 7. Графики K_c (синий цвет), облачности по спутниковым данным (красные точки) и TCC ERA5 (зеленый цвет) для 02.12.2020 и 29.12.2020, иллюстрирующие влияние на данные камеры ФИЛИН-1Ц света полной Луны, рассеянного на кристаллах тонкой облачности

лись наличие тонкой облачности и свечение Луны. Свет полной Луны в эти ночи рассеивался на кристаллах тонких высоких облаков либо на наледи, образовавшейся на защитном стекле камеры, и приводил к искажению данных. Таким образом, в ночи с полной Луной при привлечении критерия K_c к идентификации облачного покрова стоит учитывать возможность неточного отображения реальной картины.

Для шести ночей (9, 11, 13, 14, 19 и 26 декабря) потребовалось уточнить ярус облачности. В эти ночи достаточно высоким значениям облачности соответ-

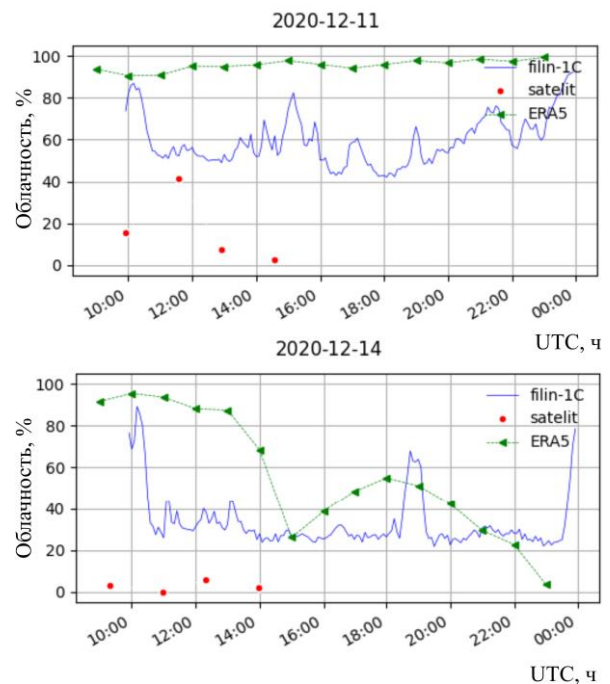


Рис. 8. Графики K_c (синий цвет), облачности по спутниковым данным (красные точки) и TCC ERA5 (зеленый цвет) для 11.12.2020 и 14.12.2020, иллюстрирующие влияние на данные камеры ФИЛИН-1Ц пелены тонкой прозрачной облачности

вуют довольно низкие значения K_c (т. е. количество видимых звезд велико). На рис. 8 для ночей 11.12.2020 и 14.12.2020 приведены графики, иллюстрирующие эту особенность. Как показал анализ исходных изображений с камеры Филин-1Ц, в эти ночи небо закрывала оптически тонкая, достаточно прозрачная для звезд пелена облачности, что и повлияло на результаты расчетов критерия K_c . Всплески K_c обусловлены кратковременными уплотнениями облачности в поле зрения камеры.

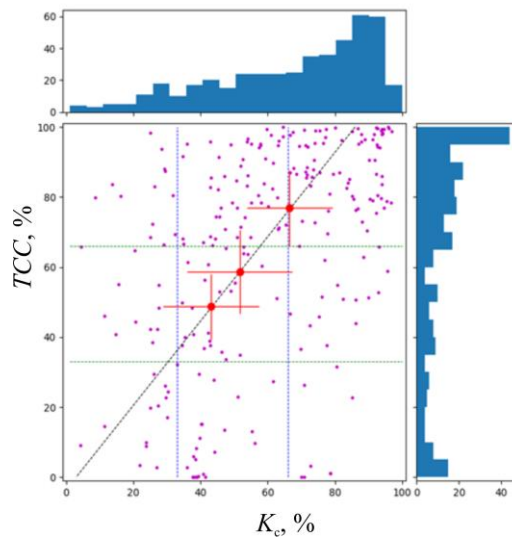


Рис. 9. Диаграмма рассеяния K_c — TCC ERA5

На рис. 9 изображена диаграмма рассеяния K_c — TCC ERA5, из которой были удалены дневные данные и ночные данные с полной Луной. Сильная дисперсия точек на диаграмме, по всей видимости, связана с нестационарным временным лагом между данными из различных источников (фотокамеры и реанализа), а также с быстрыми вариациями облачности, регистрируемыми камерой и не отображаемыми на картах реанализа. Поскольку нельзя определить, являются ли статистические распределения исследуемых параметров нормальными (малая статистика и некоторая асимметрия распределений), расчет стандартного коэффициента корреляции или применение минимизационных методов для этих наборов данных не вполне корректно. Существует достаточно большая вероятность получить смещение параметров из-за дисперсии входных данных. Для уменьшения дисперсии входных данных и последующей оценки характера зависимости рассматриваемых параметров мы разделили исходные распределения на три равных области (0–33 %, 33–67 %, 67–100 %). В этих областях для каждого набора данных определили средние значения облачности и коррелирующего параметра. Например, для диапазона 0–33 % облачности для ERA-5 (от начала оси до нижней зеленой пунктирной линии) рассчитанное среднее значение облачности по данным камеры Филин-1Ц составляет около 43 %, а для Филин-1Ц (от начала оси до левой синей пунктирной линии) рассчитанное среднее значение облачности по данным ERA-5 составляет около 42 % (см. рис. 9). Таким образом, шесть полученных усредненных значений формируют на диаграмме рассеяния три точки, отражающие характер искомой зависимости. Такое представление данных является более наглядным и позволяет увидеть наличие линейной зависимости между K_c и TCC ERA5 на слабо статистически обеспеченном наборе данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели три набора данных об облачном покрове: спутников NOAA, проекта ECMWF ERA5 и широкоугольной фотокамеры ФИЛИН-1Ц, уста-

новленной в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (Республика Бурятия, РФ). При анализе полученных результатов следует учитывать особенности всех трех баз данных. Так, спутниковые системы характеризуются малой частотой дискретизации и нестабильностью измерений во времени, что приводит к большим временным пропускам в данных. Возникают также сложности при определении облачности по данным спутников в темное время суток в зимний период. Данные реанализа являются продуктом расчета на стабильной пространственной сетке общей облачности, возникающей на разных уровнях в модельной атмосфере, с учетом предположений о степени перекрытия облаков на разной высоте. Они не могут быть отнесены к наблюдательным данным и нуждаются в проверке применительно к выбранной области пространства в выбранный промежуток времени. Данные фотокамеры ФИЛИН-1Ц получены с хорошим временным разрешением, но только для темного времени суток. Отрицательное влияние на качество получаемых ФИЛИН-1Ц изображений может оказывать лунный свет в фазы полнолуния при наличии рассеивающих кристаллов тонкой облачности.

В результате сопоставления данных об облачности спутниковых систем (NOAA) и проекта реанализа ECMWF ERA5 с K_c , рассчитанным по изображениям камеры ФИЛИН-1Ц, выявлено как согласие, так и различие данных. Можно с уверенностью сказать, что в те ночи, когда отсутствовали помехи (лунный свет, рассеянный на кристаллах тонкой облачности), данные ERA5 и ФИЛИН-1Ц согласованы очень хорошо. Это дает нам основания доверять данным об общей облачности этого проекта реанализа при их использовании для оптических и климатических исследований на Байкальской природной территории. Однако для задачи мониторинга условий наблюдений в наземной оптической обсерватории частота дискретизации во времени этих данных является недостаточной, поскольку они не воспроизводят быстрые вариации облачности. Нужно также иметь в виду, что при неплотном слоистом облачном покрове могут быть получены пониженные значения критерия K_c (завышенные значения количества звезд) по сравнению с более плотной облачностью. Общая динамика облачности по ERA5 и K_c при этом согласована достаточно хорошо. Возможно, ERA5 несколько переоценивает плотность облачного покрова по сравнению с экспериментальными данными, однако малое количество данных для анализа не позволяет с хорошей степенью достоверности судить об этом.

Вследствие нерегулярности спутниковых данных, обусловленной большими временными промежутками между пролетами спутников, и сложности определения облачности при различных условиях освещения (в дневное и в ночное время) в зимний период, уверенных выводов о применимости спутниковых данных сделать не удалось. По всей видимости, для определения облачного покрова при различных условиях освещения следует применять параметры выделения маски облачности, которые будут изменяться в течение суток. Величину ко-

эффициентов и характер их изменения можно будет в дальнейшем определить с использованием метода совместных наземных и спутниковых наблюдений облачности.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»). В работе использовались данные ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>], ECMWF ERA5, NOAA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дарчия Ш.П. Об астрономическом климате СССР. М.: Наука, 1985. 175 с.

Загайнова Ю.С., Караваев Ю.С. Оценка состояния облачности по 8-балльной шкале методом гистограмм по изображениям в видимом диапазоне, получаемым с камеры полного неба. *Солнечно-земная физика*. 2013. Вып. 23. С. 120–128.

Здор С.Е., Колинько В.И. Датчик ночной облачности. Патент RU 2436133 С2. 2011.

Казаковцев А.Ф., Колинько В.И. Способ оценки облачности ночной атмосферы и датчик ночной облачности для его осуществления. Патент RU 2678950 С1. 2019.

Кокарев Д.В., Галилейский В.П., Морозов А.М., Елизаров А.И. Устройство наблюдения оптического состояния неба в пределах видимой полусферы. Патент RU 191582 U1. 2019.

Михалев А.В., Подлесный С.В., Стоева П.В. Свечение ночной атмосферы в R-G-B цветовом представлении. *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 3. DOI: [10.12737/19040](https://doi.org/10.12737/19040).

Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Киселев А.В. О статистике астроклиматических характеристик в районе расположения Саянской солнечной обсерватории. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 126–133. DOI: [10.12737/szf-61202012](https://doi.org/10.12737/szf-61202012).

Ahlgrimm M., Forbes R. Improving the representation of low clouds and drizzle in the ECMWF model based on ARM observations from the Azores. *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142, iss. 2. P. 668–685. DOI: [10.1175/MWR-D-13-00153.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00153.1).

Forbes R.M., Ahlgrimm M. On the representation of high-latitude boundary-layer mixed-phase cloud in the ECMWF global model. *Monthly Weather Review*. 2014. Vol. 142, iss. 9. P. 3425–3445. DOI: [10.1175/MWR-D-13-00325.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00325.1).

Forbes R.M., Tompkins A.M. An improved representation of cloud and precipitation. *ECMWF Newsletter*. 2011. Vol. 129. P. 13–18. DOI: [10.21957/nfgulzhe](https://doi.org/10.21957/nfgulzhe).

Forbes R.M., Tompkins A.M., Untch A. A new prognostic bulk microphysics scheme for the IFS. *ECMWF Technical Memorandum No. 649*. 2011. 28 p. DOI: [10.21957/bf6vjvxx](https://doi.org/10.21957/bf6vjvxx).

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 Global Reanalysis. *QJRM*. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

Lei Y., Letu H., Shang H., Shi J. Cloud cover over the Tibetan Plateau and eastern China: a comparison of ERA5 and ERA-Interim with satellite observations. *Climate Dynamics*. 2020. Vol. 54. P. 2941–2957. DOI: [10.1007/s00382-020-05149-x](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05149-x).

Qinglong You, Yang Jiao, Houbo Lin, et al. Comparison of NCEP/NCAR and ERA-40 total cloud cover with surface observations over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*. 2014. Vol. 34, iss. 8. P. 2529–2537. DOI: [10.1002/joc.3852](https://doi.org/10.1002/joc.3852).

Stowe L., Davis P., McClain E. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the advanced very high resolution radiometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1999. Vol. 16. P. 656–681. DOI: [10.1175/1520-0426\(1999\)016<0656:SBAIEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0656:SBAIEO>2.0.CO;2).

Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*. 1989. Vol. 117, iss. 8. P. 1779–1800. DOI: [10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2).

Tiedtke M. Representation of clouds in large-scale models. *Monthly Weather Review*. 1993. Vol. 121, iss. 11. P. 3040–3061. DOI: [10.1175/1520-0493\(1993\)121<3040:ROCILS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<3040:ROCILS>2.0.CO;2).

URL: <https://www.ecmwf.int> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

URL: <https://www.scanex.ru> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 30 мая 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 102–109. DOI: [10.12737/szf-84202210](https://doi.org/10.12737/szf-84202210).