

Возможности количественного описания мезомасштабных процессов в атмосфере на основе анимационного анализа

Д.М. Ермаков^{1,2}, Е.А. Шарков², А.П. Чернушич¹

¹*Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия
E-mail: dima@ire.rssi.ru*

²*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: e.sharkov@mail.ru*

Рассмотрены новые возможности анимационного анализа, связанные с использованием результатов промежуточных расчетов, а именно, векторных полей смещений, которые представляют собой, с точностью до нормировочного множителя, поля скоростей малых элементов, наблюдаемых на спутниковых изображениях. Так, если в качестве наблюдаемой скалярной величины рассматривается интегральное паросодержание атмосферы, то соответствующее векторное поле имеет смысл эффективной скорости адвекции водяного пара. Объединяя синхронные ряды наблюдаемой скалярной величины и векторного поля скоростей ее перемещения, можно рассчитать адвективный поток через заданную границу или замкнутый контур. В случае анализа интегрального паросодержания результатом будет поток скрытого тепла в МВт.

Обсужден алгоритм нормировки и пересчета в сферическую систему координат векторных полей смещений и получения конечных оценок потоков в стандартных единицах измерения. Приведены примеры расчета на реальных спутниковых данных.

Ключевые слова: анимационный анализ, адвективные потоки, скрытое тепло.

Введение

В работах (Ермаков и др., 2007, 2011, 2013а) изложен авторский подход к анимационному анализу спутниковых данных, позволяющему детализировать стадии быстрых процессов в системе атмосфера-океан Земли, наблюдаемых с помощью спутниковых измерений. Подход позволяет исследовать эволюцию процессов в полях восстанавливаемых геофизических параметров (для краткости будем называть их полями W , подразумевая, в первую очередь, интегральное паросодержание атмосферы) за счет методики пространственно-временной интерполяции, основанной на алгоритме оценки и компенсации движения. На выходе алгоритма формируются расчетные векторные поля «движения» (M -поля), т.е. относительных смещений малых элементов (2×2 узла на сетке измерений) скалярных полей W . Совокупность расчетных смещений описывает переход поля W , наблюдаемого в более ранний момент времени, к полю W , наблюдаемому позднее (например, через 12 часов). С использованием расчетных M -полей производится интерполяция наблюдаемых полей W в промежуточные моменты времени (например, с шагом 1,5 – 3 часа) без потери пространственного разрешения, что дает возможность более детального исследования наблюдаемых процессов.

Нужно отметить, что различные способы реализации подобного анимационного подхода предложены и развиваются и в ряде других работ. Так, идейно близкий способ описан в работах (Wimmers and Velden, 2007, 2011), где для расчета промежуточных ста-

дий процесса также применяются своего рода **М**-поля. Однако, эти **М**-поля не рассчитываются непосредственно из интерполируемых спутниковых данных, а формируются путем применения некоторых феноменологических правил к дополнительно привлекаемой спутниковой и модельной информации. Возможно, это одна из причин, по которым авторы указанного подхода не рассматривали возможность следующего шага анимационного анализа, описанного в настоящей работе.

Существуют и альтернативные возможности реализации анимационного анализа. Например, в работе (Нерушев и Крамчанинова, 2011) рассмотрено (как частный случай) поле интегрального паросодержания атмосферы W , восстановленное по данным геостационарных спутников, а его эволюция описывается с помощью специально конструируемого оператора преобразования. Подход интересен тем, что расчетный оператор в явном виде учитывает наряду с трансляциями и деформациями также вращения областей поля, хотя вычислительная сложность алгоритма при этом существенно возрастает. Но поскольку для дальнейшей пространственно-временной интерполяции полей W не требуется расчета **М**-полей, т.е. оценки скоростей малых элементов поля W в явном виде, то реализация дальнейшего расчета потоков не столь очевидна. Во всяком случае, в известных нам подходах к анимационному анализу (в том числе, указанных выше) эта идея ранее не обсуждалась. В рамках нашего подхода она предложена в (Ермаков и др., 2013б) и впервые описана алгоритмически в настоящей работе.

Суть идеи заключается в том, чтобы пересчитать полученные **М**-поля из координат спутниковых изображений (пикселей) в координаты на поверхности Земли (в сферическом приближении) и, нормировав на известные промежутки времени между последовательно наблюдаемыми стадиями процесса, получить поля скоростей перемещений в м/с. Далее, объединяя полученные поля скоростей с приведенными к тем же моментам времени полями W , рассчитывать потоки через произвольно задаваемые границы или контуры. Если расчет проводится для интегральных характеристик атмосферы, результатом является «эффективный» (интегральный по высоте) адвективный поток соответствующей характеристики. В настоящей работе идея конкретизирована на примере обработки анимированных полей интегрального паросодержания атмосферы, рассчитанных по данным измерений SSM/I за июль/август 2000 г., результаты пересчитаны (элементарной нормировкой) в потоки скрытого тепла.

Характеристика входных данных

Для описываемого в работе шага анализа входными данными являются результаты выполненной пространственно-временной интерполяции полей W . В рассматриваемом ниже примере это анимированные поля интегрального паросодержания атмосферы глобального покрытия с шагом сетки $0,2^\circ$ по широте и долготе и шагом по времени 1,5 часа, а также соответствующие M -поля на глобальной сетке с шагом $0,4^\circ$ и шагом по времени 3 часа. Разрешение по пространству и времени для M -полей вдвое ниже, чем для полей W , что вытекает из базовой расчетной схемы. Для оценки пространственных вариаций поля W необходимо исследовать как минимум (в пределе) пару соседних узлов сетки по горизонтали и вертикали – отсюда увеличение вдвое пространственного шага. Для реконструкции промежуточного состояния поля W необходимо построить M -поле по паре «соседних по времени» полей W , разделенных вдвое большим интервалом времени. В рамках исходной модели оценки и компенсации движения M -поля строятся в предположении достаточной гладкости, поэтому для упрощения алгоритма расчета потоков M -поля предварительно интерполировали на узлы сетки полей W , т.е. повышали их пространственное разрешение вдвое. Таким образом, окончательные оценки потоков были рассчитаны с шагом по времени 3 часа по данным на сетке $0,2^\circ$. Были использованы результаты выполненной ранее анимации поля интегрального паросодержания атмосферы по данным SSM/I за 28.07 – 26.08 2000 г. (Ермаков и др., 2013в).

В качестве контуров для расчета адвективных потоков скрытого тепла выбирали окружности разных радиусов, центрированные относительно глаза действующего тропического циклона (ТЦ). Положения активных ТЦ за указанный выше период времени уточняли по данным (Покровская и Шарков, 2006).

Алгоритм расчета потоков

Рассмотрим сначала схему расчета потока через некоторый элемент контура в системе координат спутникового изображения (рис. 1). Поскольку в дальнейшем будут использованы круговые контуры с заданными центрами и радиусами, удобно ввести радиальную систему координат с центром в предполагаемом центре контура (x_0, y_0) . Пусть рассматриваемый элемент контура $\vec{l} = (l_x, l_y)$ проходит через конец радиус-вектора \vec{r} с координатами (x, y) , составляющего угол α с горизонтальной осью (рис. 1), так что $x = x_0 \cdot \cos \alpha$, $y = y_0 \cdot \sin \alpha$. Обозначим внешнюю нормаль (в направлении \vec{r}) к элементу

контура в точке (x, y) через $\vec{n} = (n_x, n_y) = (\cos \alpha, \sin \alpha)$, а значение \mathbf{M} -поля в той же точке – через $\vec{m} = (m_x, m_y)$.

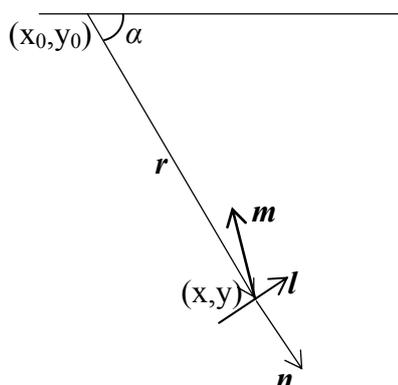


Рис. 1. Схема расчета потока через элемент контура

Для расчета потока через элемент контура в стандартных единицах необходимо перейти от вектора \vec{m} в координатах изображения к вектору скорости \vec{v} в м/с относительно Земли и учесть проективные искажения. Пусть строки спутникового изображения занумерованы так, что координата $y = 0$ соответствует 90° с.ш. и возрастает к югу (сверху вниз), а координата $x = 0$ соответствует 180° з.д. и возрастает к востоку (слева направо). Изменение любого индекса на единицу приводит к изменению угловой координаты (широты или долготы) на величину $s = 0,2^\circ$, равную шагу сетки. Поэтому координаты (x, y) выражаются через долготу λ и широту θ следующим образом:

$$\lambda_x = s \cdot x - \pi, \quad \theta_y = \frac{\pi}{2} - s \cdot y, \quad (1)$$

а угловые меры вектора $\vec{m} = (m_x, m_y)$ в координатах долготы λ и широты θ составляют:

$$m_\lambda = s \cdot m_x; \quad m_\theta = -s \cdot m_y. \quad (2)$$

Элементарные соотношения сферической геометрии дают:

$$\vec{v} = \frac{Rs(\sin(s \cdot y) \cdot m_x, -m_y)}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $R = 6371$ км – средний радиус Земли, $\Delta t = 3$ часа – временной шаг интерполяции.

Аналогично, вектор единичной нормали к элементу контура после коррекции проективных искажений равен:

$$\vec{n}' = \frac{(\sin(s \cdot y) \cdot \cos \alpha, -\sin \alpha)}{\sqrt{\sin^2(s \cdot y) \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}}, \quad (4)$$

а длина элемента контура на поверхности Земли:

$$|l'| = R \cdot s \cdot r \cdot d\alpha \cdot \sqrt{\sin^2(s \cdot y) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (5)$$

где r – длина вектора \vec{r} (рис. 1) в координатах спутникового изображения (пикселях), а $d\alpha$ – угол, под которым виден элемент контура l из точки (x_0, y_0) на изображении.

Тогда поток поля скоростей \vec{v} через элемент контура с нормалью \vec{n}' в точке (x, y) равен:

$$d\Phi(x, y) = -(\vec{v} \cdot \vec{n}') \cdot |l'| = -\frac{R^2 s^2 r (\sin^2(sy) m_x \cos \alpha + m_y \sin \alpha) \sqrt{\sin^2(sy) \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}}{\Delta t \sqrt{\sin^2(sy) \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}} d\alpha. \quad (6)$$

Знак выбран таким образом, чтобы положительный поток был направлен внутрь контура.

Отсюда просто перейти к потоку скрытого тепла через тот же элемент контура:

$$dQ(x, y) = q \cdot W(x, y) \cdot d\Phi(x, y), \quad (7)$$

где $q = 2260$ КДж/кг – удельная теплота парообразования, $W(x, y)$ – интегральное паросодержание атмосферы в точке (x, y) в кг/м² (или в мм).

Численное интегрирование выражения (7) по углу α от 0 до 2π дает значение потока скрытого тепла через круговой контур радиуса r (пикселей), centered в точке с координатами (x_0, y_0) на спутниковом изображении (отметим, что вследствие проективных искажений, возникают отличия формы контура на поверхности Земли от круговой, увеличивающиеся по мере смещения контура в высокие широты). С учетом (6) конечное выражение (7) замкнуто относительно входных данных, т.е. расчет может быть проведен непосредственно по результатам предшествующей пространственно-временной интерполяции (синхронной паре поля W и \mathbf{M} -поля). Для контура радиуса r шаг интегрирования $d\alpha$ разумно выбирать из соотношения $r \cdot d\alpha \sim 1$, что соответствует длине элементов контура, примерно равной расстоянию между соседними узлами координатной сетки.

В заключение этого раздела сделаем еще одно важное замечание. Выражения для потоков (6) и (7) получены для неподвижного относительно Земли контура. Иногда предпочтительно учесть «дрейф» контура относительно Земли. Это не вносит принципиальных изменений в расчетный алгоритм, однако требует коррекции полученных выражений. Фактически, коррекция сводится к тому, что в выражении (6) нужно вместо скорости \vec{v}

подставить скорость $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$, где \vec{u} – скорость дрейфа. Выбор скорости дрейфа определяется постановкой задачи. В ряде случаев в качестве первого приближения можно использовать среднее по контуру значение \vec{v} :

$$\vec{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v}_i, \quad (8)$$

где \vec{v}_i – значение скорости, рассчитанное по (3) для i -го узла сетки, включенного в контур, N – общее число узлов, включенных в контур.

Примеры расчета потоков

В этом разделе кратко описаны некоторые примеры практического применения алгоритма расчета потоков. Подробный анализ полученных результатов выходит за рамки настоящей публикации и составляет предмет отдельного рассмотрения. Общая идея в приведенных примерах состояла в следующем. В интервале времени 28.07 – 26.08 2000 г. выбирали действующие тропические циклоны (ТЦ), окружали их семейством концентрических круговых контуров разных радиусов, рассчитывали временные ряды потоков скрытого тепла через эти контуры и сопоставляли изменения потоков через контуры разных радиусов с соответствующими изменениями интенсивности ТЦ (максимальной устойчивой скорости ветра в стене). Расчет проводили для дрейфующих контуров, скорость дрейфа оценивали по (8).

Наиболее интересным случаем в указанном интервале времени является ТЦ Alberto (3 – 23 августа 2000 г.). Траектория ТЦ Alberto представлена на *рис. 2а*. Цвета кодируют разные стадии эволюции ТЦ Alberto по (Покровская и Шарков, 2006): TL и L – голубой, TD – зеленый, TS – оранжевый, STS – красный, T – темно красный. В ходе своей эволюции ТЦ трижды достигал стадии урагана. На *рис. 2б* представлена эволюция ТЦ Alberto в терминах максимальной устойчивой скорости ветра в стене глаза (красная линия) и минимального давления в центре глаза (черная линия). Как видно, достижению стадии урагана каждый раз предшествовала фаза быстрой интенсификации ТЦ: характерное пороговое значение ~ 15 м/с за сутки (Kaplan et al., 2010) иллюстрирует наклон красных пунктирных линий. Одинаковыми цифрами на *рис. 2а* и *2б* помечены одинаковые моменты времени.

На *рис. 2в* представлен ТЦ Alberto в поле интегрального паросодержания атмосферы W на 11:00 UTC 11.08.2000. Цветовая шкала W в мм приведена справа. ТЦ окружен двумя контурами с радиусами 40 пикселей ($\sim 8^\circ$) и 44 пикселя ($\sim 8,8^\circ$). Пару контуров строили для проверки устойчивости расчетов потока. Как видно из *рис. 2а* и *2в*, все время

своего существования ТЦ Alberto двигался достаточно далеко от береговой линии, что обеспечило лучшее качество расчетов: близость суши обуславливает как возрастание погрешностей оценки паросодержания, так и дополнительные ошибки при расчете векторов смещений.

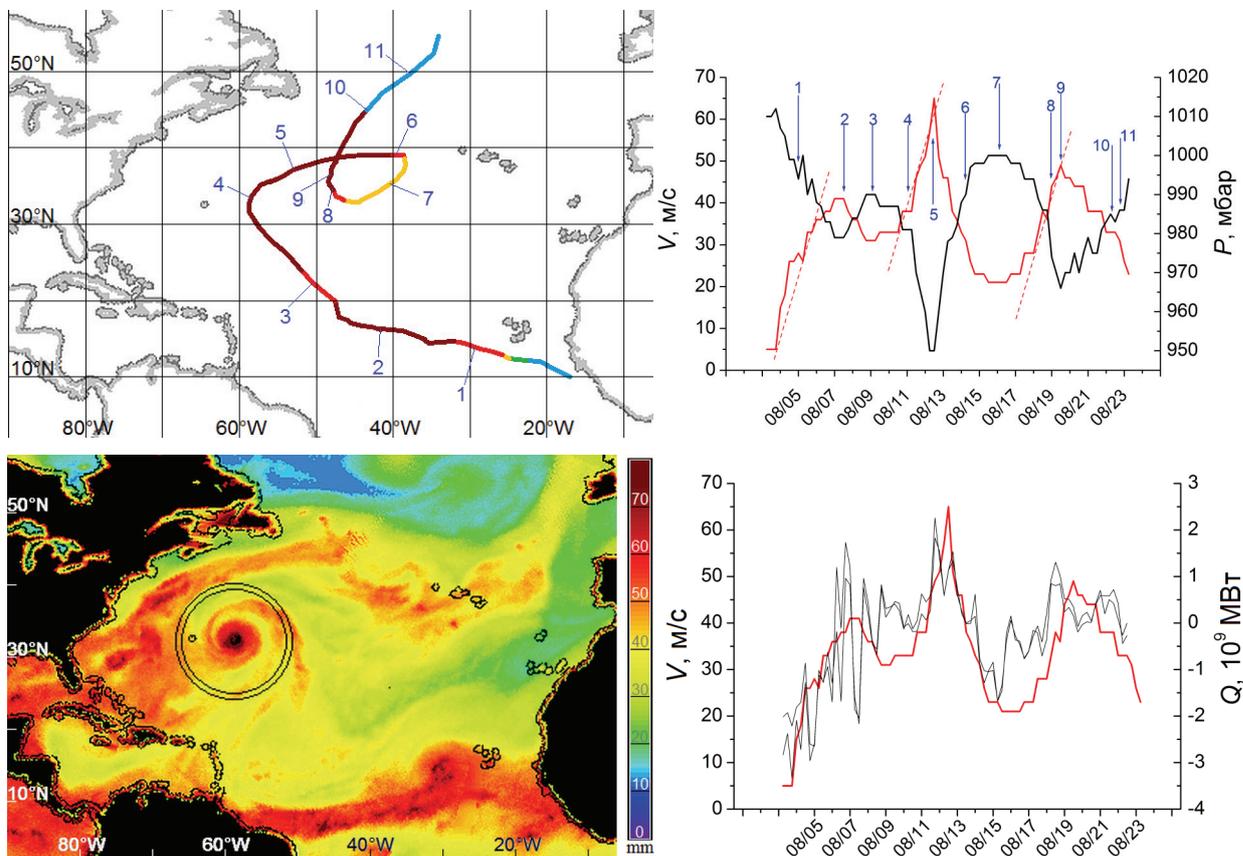


Рис. 2. Анимационный анализ ТЦ Alberto: а) траектория ТЦ; б) эволюция ТЦ; в) ТЦ в поле интегрального паросодержания атмосферы W (справа шкала в мм), показаны два контура для расчета потоков; г) адвективные потоки скрытого тепла Q через контуры рис. 2в (черные линии) и интенсивность ТЦ (красная линия), см. пояснения в тексте

На рис. 2г представлены расчетные графики потоков скрытого тепла в МВт через контуры, приведенные на рис. 2в (черные линии). Для облегчения сравнения на этом же графике воспроизведена кривая интенсивности ТЦ (максимальной устойчивой скорости ветра в стене глаза с рис. 2а, красная линия). Кривые потоков всюду близки друг к другу, что свидетельствует об устойчивости расчетов по отношению к малым изменениям граничного контура. Кроме того, можно отметить, что кривые потока хорошо воспроизводят основные особенности эволюции ТЦ, а именно, фазе интенсификации соответствует положительный, конвергентный поток скрытого тепла (внутри контура), а диссипации – дивергентный. Более подробное рассмотрение и анализ полученных результатов требует отдельной публикации.

Заключение

В настоящей работе впервые описан алгоритм расчета адвективных потоков скрытого тепла (и других характеристик системы атмосфера-океан Земли) в рамках последовательно развиваемого авторами подхода к анимационному анализу спутниковых дистанционных данных. Одной из специфических черт подхода является его замкнутость относительно анализируемых спутниковых данных. Предложенный алгоритм расчета потоков базируется на результатах предварительной пространственно-временной интерполяции и также не требует привлечения дополнительной спутниковой или модельной информации, поэтому он естественным образом включается в общую схему анимационного анализа.

Алгоритм расчета применительно к задачам исследования тропического циклогенеза, как частного случая мезомасштабных процессов в системе атмосфера-океан Земли, проиллюстрирован на примере ТЦ Alberto. При этом рассмотрены только поля интегрального паросодержания атмосферы и производная величина – скрытое тепло. Однако, очевидна возможность применения алгоритма для анализа самых разнообразных процессов. В зависимости от контекста задачи и типа наблюдаемых явлений можно выбирать для анализа различные геофизические поля (температурные, ветровые, влажностные и т.д.) и исследовать потоки через разные границы (семейства контуров и/или сечений). Так, например, в контексте задач исследования полярного переноса интересно рассмотреть потоки через набор границ, проходящих над акваториями Мирового океана в долготном направлении на разных широтах.

При анализе эволюции ТЦ с помощью набора круговых контуров разных радиусов, «дрейфующих» вместе с циклонами, была обнаружена взаимосвязь между интенсивностью ТЦ и потоками скрытого тепла через соответствующие контуры. Обнаруженная взаимосвязь требует дальнейшего глубокого анализа на представительном наборе ТЦ (желательно, проходивших на удалении от суши и испытывавших многократные стадии интенсификации) с привлечением значительных объемов спутниковой информации. Эта задача является одной из приоритетных в дальнейших исследованиях авторов. Она, в частности, потребует развития созданного ПО и его адаптации к данным спутниковых приборов нового поколения: SSMIS, AMSR2 и др.

Литература

1. *Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслов А.И., Шарков Е.А.* Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С.7-13.
2. *Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Шрамков Я.Н.* Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан-атмосфера на базе программной платформы

- Stream Handler // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 9-16.
3. *Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А.*, 2013а. Алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан-атмосфера высокой пространственно-временной дискретизации по спутниковым микроволновым измерениям // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 72-82.
 4. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П.*, 2013б. Анимационный анализ прецедентов быстрой интенсификации тропических циклонов / Тезисы докладов Международной конференции «Дистанционное зондирование окружающей среды: научные и прикладные исследования в Азиатско-Тихоокеанском регионе (RSAP2013)», 24 – 27 сентября 2013 г., Владивосток, Россия. С. 63-64.
 5. *Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Покровская И.В., Чернушич А.П.*, 2013в. Обнаружение энергетических источников в переменяемых режимах интенсивности ТЦ Alberto при его эволюции по данным спутникового микроволнового зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 39-49.
 6. *Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К.* Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исследование Земли из космоса. 2011. № 1. С. 3-13.
 7. *Покровская И.В., Шарков Е.А.* Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1. (1983-2005). М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
 8. *Kaplan, J., DeMaria, M. and Knaff, J.A.* A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and Eastern North Pacific basins // *Wea. and Forecasting*, 2010. Vol. 25. P. 220-241.
 9. *Wimmers A.J., Velden C.S.* MIMIC: A new approach to visualizing satellite microwave imagery of tropical cyclones // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2007. Vol. 88. No. 8. P. 1187-1196.
 10. *Wimmers A.J., Velden C.S.* Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2011. Vol. 50. No. 5 P. 1024-1036.

Possibility of quantitative description of mesoscale processes in the atmosphere based on the animated analysis

D.M. Ermakov^{1,2}, E.A. Sharkov², A.P. Chernushich¹

¹*Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Dept., Fryazino, Russia*

E-mail: dima@ire.rssi.ru

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: e.sharkov@mail.ru

New possibilities of animated analysis are considered associated with the use of the results of intermediate calculations, namely, vector fields of displacements, which represent, up to a normalization factor, the velocity field of small elements observed in the satellite imagery. If the observed scalar quantity is total precipitable water, then the corresponding vector field is the effective rate of advection of water vapor. By combining synchronous series of the scalar field of the observed quantity and the vector field of its motion, the advective flow through a given boundary of closed loop can be calculated. In the analysis of total precipitable water field, the result is the latent heat flux in MW. An algorithm is discussed for normalization and conversion into a spherical coordinate system of the vector fields of motion to obtain the final estimates of flux in standard units. Examples of calculations based on real satellite data are given.

Keywords: animated analysis, advective flux, latent heat.

References

1. Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A., *Elektronnaya baza mnogoletnih dannyh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean-atmosfera (Electronic long-standing database for the global radiothermal field of the Earth in context of multy-scale investigation of the atmosphere-ocean system)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 1, pp. 7–13.
2. Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Shramkov Ya.N., *Vozможности postroeniya kratkosrochnykh global'nykh radioteplovykh izobrazheniy sistemy okean-atmosfera na baze programmnoy platformy Stream Handler (Possibility of building short-term global radiothermal images of ocean-atmosphere system based on Stream Handler software platform)*, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 9–16.

3. Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Algoritm postroeniya global'nyh radioteplovyh poley sistemy oken-atmosfera vysokoy prostranstvenno-vremennoy diskretizatsii po sputnikovym mikrovolnovym izmereniyam (An algorithm for construction of global ocean-atmosphere radiothermal fields with high spatiotemporal sampling based on satellite microwave measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 4, pp. 72–82.
4. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P., Animatsionnyy analiz pretsedentov bystroy intensifikatsii tropicheskikh tsiklonov (Animated analysis of precedents of rapid intensification of tropical cyclones), *Remote sensing of environment: Scientific and applied research in Asia-Pacific, Proc. of International conference*, Vladivostok, 24–27 September 2013, Vladivostok: Dal'nauka, 2013, p. 63.
5. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Chernushich A.P., Obnaruzhenie energeticheskikh istochnikov v peremezhaemykh rezhimakh intensivnosti TTs Alberto pri ego evolutsii po dannym sputnikovogo mikrovolnovogo zondirovaniya (Detection of energy sources in the intermittent modes of TC Alberto's intensity by satellite microwave data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 4, pp. 39–49.
6. Nerushev A.F., Kramchaninova E.K., Metod opredeleniya harakteristik atmosferykh dvizheniy po dannym izmereniy meteorologicheskikh geostatsionarnykh sputnikov (A method of retrieval of characteristics of atmospheric motions by data of measurements from meteorological geostationary satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 1, pp. 3–13.
7. Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A., *Tropicheskie tsiklony i tropicheskie vozmushcheniya Mirovogo okeana: khronologiya i evolyutsiya. Versiya 3.1. (1983-2005)* (Tropical cyclones and tropical disturbances of the World ocean: chronology and evolution. Version 3.1. (1983-2005)). Moscow: Poligraph servis, 2006, 728 p.
8. Kaplan J., DeMaria M. and Knaff J.A., A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and Eastern North Pacific basins., *Wea. and Forecasting*, 2010, Vol. 25, pp. 220–241.
9. Wimmers A.J., Velden C.S., MIMIC: A new approach to visualizing satellite microwave imagery of tropical cyclones, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2007, Vol. 88, No. 8, pp. 1187–1196.
10. Wimmers A.J., Velden C.S., Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2011, Vol. 50, No. 5, pp. 1024–1036.