Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы. Третья часть. Иерархия долин

А.А. Златопольский

Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Россия E-mails:aazlat@gmail.com

В статье публикуются новые и суммируются предыдущие результаты исследования среднего направления элементов рельефа разного масштаба (размера). Анализ разнообразных территорий показал, что существуют особые масштабы, при переходе к которым направление рисунка рельефа изменяется скачком существенно чаще, чем в среднем. Эти особые масштабы проявляются как на отдельных территориях, так и в целом почти на четверти суши. Что происходит с рисунком рельефа на этих масштабах, детально рассмотрено через соотношение направления долин разной ширины. Результаты получены с помощью технологии LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis), которая автоматически выявляет положение и направление оси долин и рассчитывает их среднее направление в окне. По данным SRTM (Shuttle radar topographic mission) проанализировано около 30 разнообразных участков земной поверхности в очень широком диапазоне масштабов. Предложена гипотеза о существовании иерархии долин со статистически квантованными значениями ширины. Эта гипотеза позволяет объяснить наличие особых масштабов, а эти масштабы, в свою очередь, позволяют оценить диапазоны значений ширины для уровней иерархии долин. Приведена геометрическая последовательность, описывающая центры этих диапазонов. Дается сопоставление предложенной гипотезы с законами Хортона.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, мультимасштабный анализ, особые масштабы, долины, иерархия долин

Одобрена к печати: 14.07.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-37-46

Введение

В работах этого цикла (Златопольский, 2013) изучалось соотношение среднего направления для элементов рельефа разного размера (масштаба). По цифровой модели рельефа (ЦМР) выявлялись хребты и долины, определялось их направление и в окрестности (окне) фиксированного размера вычислялось их среднее направление. Далее, постепенно, шаг за шагом, изменялся масштаб анализа, т.е. размер выявляемых элементов рельефа, и на каждом шаге определялось их среднее направление в том же окне. Нередко при смене масштаба среднее направление изменялось, и иногда скачком (на большую величину при небольшом изменении масштаба). Фиксировалось, при каком масштабе происходили такие скачки. Аналогично анализировался рельеф и в других (скользящих) окнах. Оказалось, что в использованном диапазоне масштабов существует такой «особый» масштаб, при переходе к которому скачки среднего направления происходят существенно (в разы!) чаще, чем при других масштабах. Причем, этот масштаб оказался особым (сокр. ОМ) не только на совершенно разных территориях Земли (например, районы Байкала, Конго, Амазонки), но и в целом для почти четверти территории суши.

В предшествующих работах подробно описаны методика эксперимента, параметры анализа и способы проверки достоверности полученных данных, но объяснения этому эффекту найти не удавалось. Было предположение о связи ОМ с тектоническим строением, а Малкин Б.В. (устное сообщение) предположил связь этого явления со свойствами гидросети. В этой статье приводятся новые экспериментальные данные, а главное, более детальное описание того, что именно вызывает указанную резкую смену среднего направления элементов рельефа. Как указывалось ранее, результат анализа — среднее направление элементов рельефа, гистограмма скачков — совершенно не зависит от того, измерять ли только долины или и долины, и хребты. Однако для тонкого описания смены направления удобнее использовать только долины. В статье предложена гипотеза о свойствах иерархии долин разной ширины, которые могут порождать особые масштабы. Отмечены параллели этой гипотезы с закономерностями, установленными Р.Е. Хортоном (1948). Начнем изложение с краткого описания обнаруженных особенностей среднего направления долин, акцентируя внимание на том, как сказываются в этих измерениях долины разной ширины.

Основные методы анализа

Для получения объективных результатов измерения проводятся на долинах, которые автоматически выявляются по ЦМР (SRTM). Точки (пиксели), относящиеся к осям долин, находятся и анализируются с помощью программы LESSA (Златопольский, 2011). Пиксель относится к оси долины, если в нем сходится два противоположных склона, снижающихся к этой точке. Диаметр окрестности этого анализа составляет 10 пикселей, так что уверенно выявляются долины длиной и шириной 8 пикселей и более, а вот долины меньше 5 пикселей не обнаруживаются совсем. При таком алгоритме в первую очередь ширина долины (точнее, ширина бассейна) ограничивает возможность ее обнаружения. Если анализировать данные того или иного разрешения (т.е. разной детальности), то программа LESSA будет выявлять долины той или иной ширины, т.е. того или иного масштаба. Назовем «граничной» ширину долины (в км), которая позволяет ей хорошо выявляться при использованном разрешении (долины с меньшей шириной выявляются плохо). В экспериментах (Златопольский, 2015) использована логарифмическая шкала масштабов и соответствующие значения разрешения: для масштаба с номером *m* используется ЦМР с разрешением $0,06511 \times 2^{((m-1)/4)}$ км в пикселе, при котором выявляются долины с граничной шириной около $0.5 \times 2^{((m-1)/4)}$ км. Масштаб *т* на каждом шаге анализа изменяется на 2 единицы, а значит, граничная ширина долины при этом меняется в $\sqrt{2}$ раз.

В качестве примера рассмотрим долины, полученные по ЦМР района «Байкал». Масштаб изменяется от m = 10 до 32, т.е. примерно в 45 раз (2^{5,5}). На *рис. 1а* показана подсвеченная ЦМР этого района, а на *рис. 16* — долины, выявленные при m = 22. Показан и пример круглого окна расчета среднего направления. На *рис. 2* приведены долины, выявленные в небольшом фрагменте этого окна на масштабах m = 14; 18 и 22 (*рис. 2a*, *б*, *в* соответственно), детальность каждый раз меняется в два раза.

Рассмотрим, как именно изменяется рисунок долин, если следовать от грубого разрешения к детальному. При m = 22 (*рис. 2в*) в основном выявляются широкие долины (далее будем называть их «основными»), вытянутые в северо-восточном (CB) направлении. При m = 18 (*puc. 26*) эти долины выявлены детальнее, но кроме того проявляется и много новых, более узких, долин, чья ширина не позволяла им появиться при более грубом анализе. Эти узкие долины достаточно многочисленны, чтобы влиять на общие характеристики рисунка долин, на среднее направление, однако здесь среди новых долин не так много ортогональных притоков, так что среднее направление долин не изменилось. При следующем же увеличении детальности, m = 14 (*puc. 2a*), сразу проявилась большая масса ортогональных притоков и общее среднее направление резко изменилось на северозападное (C3).



Рис. 1. Район «Байкал»: а) — «подсвеченная» ЦМР; б) — линии долин масштаба т = 22 (19 км). Здесь и далее в скобках указана граничная ширина выявляемых малых долин



Рис. 2. Фрагмент ЦМР. Линии долин разного масштаба: a) — m = 14 (4,75 км); б) — m = 18 (9,5 км); в) — m = 22 (19 км)

Для нас важен именно этот факт — массовое проявление ортогональных долин порождает скачок среднего направления. Получается, что резкое изменение среднего направления показывает, при какой детальности анализа происходит массовое проявление ортогональных долин. На *рис. 3* приведены линии вытянутости (ЛВ), отражающие локальное среднее направление долин для разных масштабов. Так, у ЛВ при m = 14 и 18 (*рис. 3а* и *б*) есть большой участок на востоке с линиями ортогонального направления, а ЛВ для m = 18 и 22 (*рис. Зб* и *в*) при таком же изменении масштаба почти не различаются. Количественно изменения, которые мы видим в ЛВ, оцениваются по гистограмме числа скачков направления для каждого использованного масштаба измерения, где видно, при каких масштабах скачки случаются чаще. Отметим, что сравнивая пару средних направлений долин, найденных при разных масштабах, мы относим эту разницу (а значит и положение скачка) к большему масштабу. Скачок фиксируем в том случае, если существенное изменение направления произошло при отличии *m* на четыре единицы (разрешение меняется в два раза). Гистограмма для области «Байкал» представлена на *рис. 4*, кривая справа. Большой пик гистограммы, около m = 18, порожден теми изменениями среднего направления, которые мы отметили в ЛВ на *рис. За* и *б*. По гистограмме мы видим, что на масштабах 22 и больше скачки направления случаются существенно реже, но это не значит, что изменения на этих масштабах совсем не происходят — они происходят, но плавно, не скачками. Результат этих изменений можно увидеть в C3 углу, сравнивая ЛВ масштабов 22 и 32 (*рис. Зв* и *г*).



Рис. 3. Линии вытянутости по долинам разного масштаба района «Байкал»: а) — m = 14 (4,75км); б) — m = 18 (9,5 км); в) — m = 22 (19 км); г) — m = 32 (107,5 км)

Проверим, сохраняется ли этот пик на особом масштабе, OM_18, если изменить диапазон анализируемых масштабов, сдвинув его в сторону большего разрешения. Сместим диапазон масштаба анализа примерно в пять раз, *m* от 1 до 23, соответственно, в пять раз уменьшив окно анализа и сам участок анализа (Златопольский, 2013). Возьмем тот участок на востоке «Байкала» (назовем его «Шилка»), где резко изменилось направление ЛВ на *рис. За* и *б*. Гистограмма скачков для участка «Шилка» показана кривой в центре на *рис. 4*. Аналогично уменьшив окно и участок исследования, сместим диапазон анализа еще в три раза, и получим гистограмму слева на *рис. 4*. Важно отметить, что закономерность в значениях среднего направления, которую мы обнаружили в большом окне, может, но совершенно не обязана, проявиться в окне, которое в 25 раз меньше по площади. Тем не менее, мы видим, что наличие яркого пика (или сильного роста на краю диапазона) в районе OM_18 явно сохраняется во всех трех диапазонах исследования.



Рис. 4. Нормированные гистограммы скачков направления для районов: Байкал (справа); Шилка (в центре); фрагмент Шилки (слева). По оси абсцисс отложены номера масштабных шагов, а по оси ординат — относительное число скачков на каждом масштабе

Итак, в этом примере пик скачков в районе OM_18 существует, и происходит это потому, что на этой территории «основные» долины имеют CB простирание, при переходе ко все более узким долинам, до ширины в 10 км, проявляются детали основных долин, параллельные долины, а вот долины с шириной 5 км и меньше относятся уже к их непосредственным притокам, которые ориентированы преимущественно в C3 направлении. То есть OM_18 отмечает масштабную границу между широкими долинами одного простирания и узкими долинами их непосредственных притоков ортогонального направления. Причем этот переход между разнонаправленными долинами различной ширины обнаруживается в окнах совершенно разного размера — 469; 94 и 33,5 км

Экспериментальные результаты

Подытожим исследование скачков среднего направления элементов рельефа, осуществленное в данном цикле работ. Изучено восемь больших областей, покрывающих 23% площади суши (Златопольский, 2013). Их суммарная гистограмма дает пик на масштабе OM_18, *рис. 5*, кривая справа. (Отметим, что в предыдущей публикации эта кривая имела еще и ложный пик на больших масштабах, появившийся из-за расчетной ошибки в анализе области «Евфрат».) В гистограммах шести областей присутствует явный пик на масштабах 16–20. В шести случаях участок большой области, в котором происходит скачок, проверен при другом диапазоне масштабов, в малых областях (как в примере с «Байкалом» и «Шилкой»). В пяти случаях скачки подтвердились, а в одном случае, когда скачки были на наименьшем масштабе большого диапазона, в малой области пик скачков оказался при еще меньшем масштабе. Проанализировано и 20 малых областей. Их суммарная гистограмма также дает пик вблизи OM_18, а кроме того, и пик вблизи OM_10, *puc. 5*, кривая слева. Меньших фрагментов проанализировано пока мало (только пять).



Рис. 5. Нормированные гистограммы суммы скачков для всех «малых» областей (слева) и всех «больших» (справа). По оси абсцисс отложены номера масштабных шагов, а по оси ординат — относительное число скачков при каждом масштабе

Экспериментальные результаты (puc. 5), отражают ситуацию «в общем», а в отдельных областях картина может отличаться существенно. В первую очередь отметим, что скачки среднего направления отмечались далеко не в каждом окне, хотя в некоторых окнах скачки происходили не один раз. Кроме того, количество скачков в разных областях различается существенно — есть области «населенные», в их гистограммах зафиксировано много скачков, а другие — «ненаселенные». Далее будем говорить о малых областях, в которых ситуация разнообразнее, чем в больших, при том что у малых областей близкая площадь и единый диапазон масштабов анализа. Так, в области «Шилка» зафиксировано в 5,5 раз больше скачков, чем в области «Лабрадор». Если взять шесть самых населенных областей, то они дают такой же вклад в суммарную гистограмму, как и 14 остальных, и в их гистограммах всегда есть явные пики в районе ОМ 18 или ОМ 10. А вот у ненаселенных областей ситуация иная: есть гистограммы с явными пиками, но больше — со слабо выраженными; в трех областях эти пики не рядом с ОМ; а иногда пиков нет совсем. В ненаселенных гистограммах, в отличие от населенных, часто встречается технический рост числа скачков на самых больших масштабах. Почти все населенные области выбраны по тем участкам больших областей, где отмечены скачки (как «Шилка»), а ненаселенные выбраны произвольно — как по участкам с выраженными речными долинами («Испания», «Балканы»), так и со сложным рельефом («Лабрадор», «Тибет»).

Результаты наблюдений. Гипотеза об иерархии долин

Выше приведены объективные экспериментальные результаты, а далее рассмотрим качественный анализ, который позволил предложить возможное объяснение этих результатов. Начнем с подробного описания того, что происходит при поиске долин с возрастающей детальностью (пример на *puc. 2*). При масштабе анализа m = 22 доминируют основные долины (граничная ширина 19 км). При уменьшении *m* начинают проявляться крупные притоки, но основные долины продолжают доминировать до ширины 9,5 км (m = 18) включительно. А вот среди более узких долин уже преобладают притоки, которые обширно проявляются при граничной ширине 4,75 км (m = 14). Притоки изменяют среднее направление долин и порождают пик скачков направления между масштабами m = 18 и 14 (положение скачка мы относим к большему масштабу в сравниваемой паре). Если продолжить процесс уточнения, то постепенно появятся притоки притоков, которые составят большинство при ширине долин меньше 2,4 км (m = 10) и множественно проявятся при ширине 1,2 км (m = 6), возможно, порождая пик скачков между масштабами m = 10 и 6.

Сформулируем три предположения относительно свойств описанной выше иерархии долин разной ширины. Наличие этих свойств могло бы объяснить происхождение выявленной особенности гистограммы скачков.

Во-первых, предположим, что ширина долин на каждом уровне иерархии не случайна, не произвольна, а лежит в некотором диапазоне значений, ближе к его центру. Диапазоны могут быть большими, но их центры существенно разнесены. Это предположение позволяет объяснить происхождение пиков в гистограммах скачков — скачки происходят чаще на масштабах, переходных между уровнями иерархии.

Во-вторых, предположим, что эти диапазоны не произвольны для каждой территории, а одинаковы для всей Земли. В этом случае и переходы между долинами разного уровня, порождающие скачки, будут происходить на разных территориях при одних и тех же переходных масштабах, порождая «особые масштабы».

Третье предположение состоит в том, что переход в иерархии от уровня к уровню происходит при одинаковом изменении ширины долин, примерно в четыре раза (т.е. центры диапазонов ширины долин отличаются в четыре раза). Есть несколько косвенных экспериментальных подтверждений этого предположения. Во-первых, найденные MO_18 и MO_10 различаются именно в четыре раза, а во-вторых, напомним экспериментальный результат, описанный в первой части исследования. Случается, что скачок в окне происходит не только на одном масштабе (m_1), но и повторно на другом (m_2). Чаще всего повторный скачок происходит тогда, когда масштаб анализа изменяется примерно в пять раз (гистограмма разницы $m_2 - m_1$ имеет моду около этого значения). И наконец, если на различных примерах наблюдать, как изменяется рисунок долин при смене масштабов (как на *puc. 2*), то можно заметить, что притоки полностью проявляются и доминируют над исходными основными долинами при изменении граничной ширины долин примерно в четыре раза. Если масштаб изменили меньше, то притоков еще мало, а если больше, то уже много притоков этих притоков.

Если исходить из третьего предположения и найденных ОМ, то (с учетом правила расчета скачка) иерархия упомянутых центров диапазонов ширины долин примерно такова — 0,2; 0,9; 3,5; 14; 57 км. Получается, что существует пять уровней иерархии (для долин шире 100 м), причем долины последнего уровня — с шириной около 57 км — редки. Переход между этими уровнями происходит при граничной ширине долин около 0,6; 2,5; 10; 40 км (m = 2, 10, 18, 36). Если же третье предположение неверно, то переходные масштабы, которые мы еще не выявили (т.е. кроме m = 10 и m = 18) будут иными.

Отметим, что именно геометрическую прогрессию средних значений, хотя и для других характеристик долин и для другой переменной — порядок притока, — предлагает Р.Е. Хортон (1948). Он использует понятие порядка, которое коротко можно пояснить следующим образом: долины, не имеющие притоков, относятся к 1-му порядку, сливаясь, они порождают долину 2-го порядка и т.д. По Хортону, «порядок основного потока для больших значений порядка увеличивается пропорционально логарифму площади водосбора», другими словами, площадь водосбора — степенная функция порядка. Есть измерения в практических исследованиях (предпринятых с иной целью), которые согласуются с этим соотношением. Так, судя по диаграммам в работе (Guth, 2011), площадь бассейнов рек порядков 4-го, 5-го, 6-го, 7-го имеют значения в довольно широких диапазонах, но центры этих диапазонов разнесены и значение каждого следующего центра больше предыдущего примерно в 4,5 раза.

Но если описанные свойства иерархии долин присутствуют везде, то почему мы не обнаружили пики скачков на всех территориях и именно на масштабах, соответствующих переходным размерам долин? Причин отсутствия скачка направления довольно много. В частности, совсем нет смены среднего направления (даже постепенного), если

– притоки не ортогональны, идут под небольшим углом к основной долине;

 основные долины (и/или притоки) не ориентированы примерно в одном направлении;

– параллельные основные долины близко расположены, в силу чего ортогональные притоки получаются очень короткими и не оказывают влияния на среднее направление. Кроме того, случается (например, «Испания»), что среднее направление изменяется существенно, но постепенно. В результате, если взять весь диапазон изменения масштабов, то среднее направление изменяется по всей территории на ортогональное, но скачков довольно мало и пиков в гистограмме нет.

Таким образом, если указанные закономерности в иерархии долин существуют, то нужно еще довольно много условий, чтобы они проявилась в пиках ОМ. В больших областях эти условия складываются чаще, и ОМ в них проявились почти во всех случаях, а вот в малых областях ситуации оказывались более разнообразными.

Заключение

Мы рассмотрели результаты мультимасштабного анализа среднего направления рельефа, опираясь на рисунок долин. Предложена гипотеза о статистической квантованности ширины долин, когда долины одного диапазона ширины в целом сохраняют свой рисунок, меняя детали. При переходе к долинам другого диапазона ширины происходит смена рисунка, который сохраняется в этом новом диапазоне. Масштаб, соответствующий переходу между указанными диапазонами, мы и отмечаем по резкой смене среднего направления рельефа (пик числа скачков среднего направления). Определено два масштаба такого перехода — при ширине долин около 2,5 и 10 км, и делается предположение о геометрической прогрессии центров диапазонов ширины долин с множителем 4 — 0,2; 0,9; 3,5; 14 и 57 км. Сходная закономерность — геометрическая прогрессия средних значений других параметров гидросети — отмечалась Хортоном. Мы обозначили и близость характеристик этой закономерности для совершенно разных территорий Земли.

В предыдущих публикациях предполагалось, что особые масштабы с резкой сменой среднего направления рельефа могут быть обусловлены свойствами гидросети и/или тектоникой. Здесь мы показали, как особые масштабы могут порождаться свойствами иерархии долин. Далее нужно удостовериться, не стоит ли за иерархией долин иерархия тектонических структур. По крайней мере, геодинамическое влияние может обуславливать эффект особых масштабов тем, что создает территории с долинами близкого простирания, а это необходимое условие для появления скачка направления.

Остались и вопросы, которые не проясняются предложенной гипотезой: в некоторых ненаселенных гистограммах скачков отмечается не пик, а широкое плато, или же, крайне редко, появляются пики на масштабах, соответствующих не краям, а центрам указанных диапазонов ширины. Нужно разобраться, происходит ли это в силу недостоверности ненаселенных гистограмм или же отражает еще не понятые особенности иерархии долин. Также необходимо далее проверять, уточнять предположения о существовании статистической квантованности — таковы ли значения центров этих квантов и одинаковы ли эти значения для всей Земли или же встречаются территории со своими, особенными свойствами иерархии долин.

Литература

^{1.} *Златопольский А.А.* Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы. Вторая часть // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 295–304.

^{2.} Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.

^{3.} *Златопольский А.А.* Мультимасштабный анализ цифровой модели рельефа. Экспериментальные закономерности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 21–29.

^{4.} Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М.: Гос. изд-во иностр. литературы, 1948. 158 с.

^{5.} *Guth P.L.* Drainage basin morphometry: a global snapshot from the shuttle radar topography mission // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. Vol. 15. P. 2091–2099.

Multiscale Earth surface texture orientation analysis. Special scales. Part three. Valley hierarchy

A.A. Zlatopolsky

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails:aazlat@gmail.com

New results on mean orientation of the terrain elements of different scales (sizes) are presented alongside with a summary of previous investigations. Analysis of a selection of regions shows that the transition to certain "special" scales has above average frequency of jump changes in relief orientation. These special scales are detected in varying regions and when analyzing large sections (up to one quarter) of the Earth's surface. What happens with the terrain pattern on those scales is examined in details looking at valleys that have different widths. All the results are obtained by utilizing LESSA technology (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). LESSA automatically detects position and orientation of the valley axis and calculates its mean direction in a sliding window. Using SRTM (Shuttle radar topographic mission) data, about 30 different parts of the Earth land were analyzed in a wide range of scales. A hypothesis is presented about the existence of a valley hierarchy with statistically quantified valley widths. This hypothesis allows explaining the above-mentioned special scales. Those special scales in turn allow detecting width ranges of the valleys on different levels of the hierarchy. The geometric sequence that sets the center of those ranges is presented. The presented hypothesis is associated with Horton's laws.

Keywords: digital terrain map, multiscale analysis, special scales, valleys, valley hierarchy

Accepted: 14.07.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-37-46

References

- 1. Zlatopolsky A.A., Mul'timasshtabnyj analiz orientacii tekstury poverhnosti Zemli. Osobye masshtaby. Vtoraja chast' (Multyscale Earth surface texture orientation analysis. Special scales. Part two), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 295–304.
- 2. Zlatopolsky A.A., Novye vozmozhnosti tehnologii LESSA i analiz cifrovoj modeli rel'efa. Metodicheskij aspekt (New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. Methodology), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 38–46.
- 3. Zlatopolsky A.A., Mul'timasshtabnyi analiz tsifrovoi modeli rel'efa. Eksperimental'nye zakonomernosti (Multiscale digital terrain map analysis. Experimental regularities), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 21–29.
- 4. Horton R.E., *Erozionnoe razvitie rek i vodosbornykh basseinov. Gidrofizicheskii podkhod k kolichestvennoi morfologii* (Erosional development of streams and their drainage basins Hydrophysical approach to quantitative morphology), Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1948, 158 p.
- 5. Guth P.L., Drainage basin morphometry: a global snapshot from the shuttle radar topography mission, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, Vol. 15, pp. 2091–2099.