Картографирование вулканических извержений на основе радиолокационной интерферометрии

П.Г. Михайлюкова, О.В. Тутубалина

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

E-mail: p.mikhaylyukova@gmail.com, olgatut@mail.ru

В работе рассматривается метод двухпроходной дифференциальной интерферометрии как самостоятельный метод картографирования изменения рельефа вулканических областей. Район картографирования – Толбачинский Дол (Камчатка), где в 2012–2013 гг. произошло трещинное извержение, получившее название Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50). На протяжении практически всего извержения выполнялась регулярная космическая съемка как оптическими сенсорами, так и радиолокационной аппаратурой. Наличие серий радиолокационных изображений (РЛИ) с восходящей и нисходящей орбит на момент извержения Плоского Толбачика, материалов оптической съемки, а также цифровых моделей рельефа до извержения и после в совокупности с полевыми данными позволило изучить применимость радиолокационной интерферометрии для комплексного тематического картографирования, разработать методику картографирования изменения рельефа вулканических районов и на новом уровне исследовать ключевые параметры ТТИ-50. В результате работы создана серия тематических карт (динамики площади лавовых потоков, комплексные карты формирования поверхности лавовых потоков), наглядно демонстрирующие возможности радиолокационной интерферометрии для тематического картографирования изменения рельефа в вулканических областях. Сравнение результатов обработки серий РЛИ с восходящей и нисходящей орбит на близкие даты позволило выполнить оценку точности метода и показало хорошую согласованность величин просядок поверхности лавовых потоков.

Ключевые слова: интерферометрия, ТТИ-50, лавовые потоки, картографирование

*Одобрена к печати: 18.02.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-153-163*

Введение

Вулканические извержения являются одним из основных агентов, существенно меняющих облик земной поверхности. Изучению продуктов извержения с точки зрения геохимических и термодинамических свойств посвящено достаточно много работ (Wilson, Parfit, 1993; Stasiuk, Jaupart, 1997; Borgia et al., 1983; Горбач, 2005, 2007; и др.). Однако особенностям пространственной динамики лавовых потоков как в разные периоды извержения, так и после его завершения, уделено существенно меньше внимания. Поскольку вулканические извержения относятся к опасным природным процессам, то в течение извержения проведение полевых работ является затруднительным. В связи с этим большую ценность для исследования лавовых потоков представляют данные дистанционного зондирования (ДДЗ).

В настоящее время данные дистанционного зондирования используются в основном для изучения температурных свойств лавовых потоков, химического состава пепловых шлейфов и их пути распространения, вычисления объема лавовых потоков. Однако анализируется лишь результат обработки космических снимков, характеризующий в большинстве случаев один анализируемый показатель. Работы по комплексному картографированию формирования и динамики лавовых потоков практически отсутствуют, в то время как отображение этих процессов на одной или нескольких карт позволит получить новую, комплексную, картину характеристик лавовых потоков для решения фундаментальных и практических задач.

Снимки оптического диапазона зачастую невозможно использовать для мониторинга процесса извержения и изучения постэруптивных процессов в связи с наличием облачнос-

ти, либо обширных пепловых шлейфов. В то же время направление применения результатов радиолокационной интерферометрии для получения комплексных характеристик состояния объектов извержения практически не развито. Однако по материалам промежуточных этапов обработки РЛИ методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии возможно получить такую информацию, как положение границ лавовых потоков в разные периоды извержения, пространственное положение очагов формирования лавовых потоков, лавоводов, участки растрескивания поверхности лав.

Метод радиолокационной интерферометрии широко используется для изучения динамики лавовых потоков (Kubanek et al, 2015; Lundgren et al., 2015). Одна из наиболее комплексных работ в этом направлении – работа Стивенса и соавторов (Stevens et al., 2001) – содержит результаты исследования формирования отраженного радиолокационного сигнала от поверхности лавы в разные периоды ее формирования, выделения контуров лавовых потоков на основе когерентности РЛИ, методы анализа динамики лавовых потоков. Однако и в этом случае результат выполненной обработки представляет собой лишь растровые изображения, без картографической генерализации, с нанесенными контурами границ лавовых потоков.

Направление тематического картографирования, в основе которого лежит метод радиолокационной интерферометрии, практически не развито. Наличие серий РЛИ с восходящей и нисходящей орбит на момент извержения Плоского Толбачика, материалов оптической космической съемки, а также цифровых моделей рельефа до извержения и после в совокупности с полевыми данными позволило изучить применимость радиолокационной интерферометрии для комплексного тематического картографирования, разработать методику картографирования вулканических извержений и на новом уровне исследовать ключевые параметры ТТИ-50.

Материалы и методика картографирования

Материалы картографирования

Для картографирования динамики формирования поверхности лавовых потоков, образовавшихся в результате ТТИ-50, использовались материалы радиолокационной съемки с космического аппарата Radarsat-2, с восходящей и нисходящей орбит в режиме Fine (разрешение $5,2 \times 7,7$ м, ширина полосы захвата 50 км). Радиолокационные изображения (РЛИ) получены на завершающий этап извержения (июнь – октябрь 2013 г.). Это не позволило восстановить площадную динамику лавовых потоков в течение всего извержения. По этой причине для изучения динамики были привлечены данные оптического (ЕО-1/АLI, SPOT-6) и радио (Radarsat-1) диапазонов, которые позволили получить целостную картину изменения площадей лавовых полей на протяжении практически всего периода извержения. Перечень использованных снимков и даты съемки приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Материалы ДЗЗ, используемые для картографирования характеристик ТТИ-50

<i>Название съемочной системы</i>	<i>Даты съемки</i>	
Radarsat-1	09.12.2012 30.01.2013 14.02.2013 19.02.2013 28.02.2013	
Radarsat-2	Восходящая орбита: 01.06.2013 25.06.2013 19.07.2013 12.08.2013 05.09.2013 29.09.2013	Нисходящая орбита: 05.06.2013 29.06.2013 23.07.2013 16.08.2013 09.09.2013 03.10.2013
EO1/ALI	06.03.2013 19.03.2013 05.04.2013 26.04.2013	
SPOT6/NAOMI	24.07.2013 11.10.2013	

Для выполнения интерферометрической обработки в качестве опорной ЦМР использовалась SRTM. Вычисление мощности лавовых потоков выполнялось на основе разницы ЦМР SRTM-X и построенной по SPOT6. Анализ их точности по опорным геодезическим точкам приведен в ранее опубликованной работе (Михайлюкова и др, 2014).

Методика картографирования

Радиолокационная интерферометрия – многоступенчатый метод обработки радиолокационных изображений, используемый для построения ЦМР или получения величин смещений земной поверхности (Захаров и др., 2012, Massonet et al., 2010). На основе фазовой составляющей зарегистрированного радиолокатором сигнала интерферометрическая обработка РЛИ позволяет получить высокоточную информацию в исследованиях того или иного явления. На промежуточных этапах интерферометрической обработки оценивают когерентность разновременных радиолокационных снимков, которая дает ценную информацию для анализа изменения состояния объектов.

В работе Стивенса и др. (Stevens et al., 2001) анализируется формирование отраженного радиолокационного сигнала от поверхности лавовых потоков (*рис. 1*). В процессе остывания лавового потока происходит его растрескивание, что, в свою очередь, приводит к нарушению согласованности сигнала, приходящего от одного и того же участка поверхности в разные моменты съемки.

Рис. 1. Схема формирования радиолокационного сигнала, отраженного от поверхности лавовых потоков (Stevens et al., 2001)

Нарушение согласованности сигнала можно использовать для выделения границ лавовых потоков и определения участков растрескивания поверхности потоков. После завершения процессов растрескивания становится возможным вычисление величин просадок лавовых потоков.

Рассмотрим методику картографирования исследуемых параметров лавовых потоков.

1. Выделение контуров лавовых потоков. С точки зрения космической съемки в световом диапазоне вулканические районы во многих случаях представляют собой однородные области. Это осложняет интерпретацию вулканических форм рельефа. Нередко на снимках светового диапазона сложно установить границу лавового потока из-за сходства отображения излившихся лав с лавами предыдущих извержений и окружающей местности. Визуальное дешифрирование РЛИ также затруднительно в силу особенностей их изобразительных свойств. Однако при обработке РЛИ интерферометрическим методом становится возможным выделение контуров лавовых потоков. Принцип выделения основан на контрасте формирующихся лавовых потоков с окружающей местностью. Возможны два варианта.

А) Когда происходит активное растрескивание лавового потока, значения когерентности, рассчитываемые по радиоинтерферометрической паре снимков, минимальны. При этом, если окружающая лавовый поток местность имеет высокие значения когерентности, то поверхность лавового потока с низкими значениями когерентности достаточно четко выделяется на фоне окружающей местности. Однако в случае завершения формирования участков лавовых потоков возможно слияние их изображения с фоновой местностью.

Б) Если значения когерентности окружающей местности низкие в связи с фенологическими изменениями растительности, либо изменениями влажности поверхности (как в случае Толбачинского Дола), то дешифрирование границы лавового потока становится возможным после завершения активной фазы растрескивания поверхности потока, когда значения когерентности становятся максимальными.

Поскольку серия РЛИ, пригодных для интерферометрической обработки, была доступна только на конец извержения, то для восстановления динамики площади лавовых потоков дополнительно использовались снимки оптического диапазона, а также радиолокационного (*табл. 1*). В результате получена картина динамики площади лавовых потоков, представленная на *рис. 3*.

2. Выделение участков растрескивания лавовых потоков. Метод двухпроходной дифференциальной интерферометрии основан на анализе пары РЛИ. Это делает возможным оценить пространственное развитие процессов растрескивания поверхности лавовых потоков в периоды между съемками. На основе расчета определяют места потери когерентности и выявляют те участки поверхности лавовых потоков, где в период между съемками еще происходило их растрескивание.

3. Вычисление величины просадок лавовых потоков. Результатом обработки пары РЛИ методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии является картина просадок поверхности лавовых потоков за период между съемками. В последние месяцы извержения характер смещений лавовых потоков имел преимущественно вертикальную направленность (просадки поверхности). Детальное описание методики вычисления просадок лавовых потоков приведено в ранее опубликованной работе (Михайлюкова и др., 2014).

Для составления тематических карт была выполнена векторизация результатов расчета величин просадок и их генерализация. Для отображения величин смещений на карте была выбрана шкала с шагом 5 см с учетом результатов оценки погрешностей вычисления величин просадок (*рис. 5*).

Наличие двух серий РЛИ, полученных с восходящей и нисходящей орбит практически в одни и те же сроки (*табл. 1*), позволяют выполнить оценку погрешностей вычисления значений просадок. В результате вычисления величин базовых линий интерферометрических пар установлено, что из всех пар снимков, полученных при съемке с восходящей орбиты, для определения величин просадок пригодна лишь одна, за 12 августа – 5 сентября 2013 г. Ближайшая по срокам к ней интерферометрическая пара, полученная при съемке с нисходящей орбиты – 16 августа 2013 г. – 8 сентября 2013 г.. Эти две пары снимков и были выбраны для анализа значений величин просадок. Однако интерферометрический метод чувствителен к проекции вектора смещений на линию визирования. Лавовые потоки помимо вертикальных смещений за период между съемками имеют незначительную компоненту горизонтальных смещений, что обуславливает необходимость коррекции результатов вычислений величин просадок с восходящей и нисходящей орбит для их сравнительного анализа. Такой процесс довольно трудоемок и продолжается в текущее время.

Анализ точности определения участков активного растрескивания поверхности лавовых потоков был выполнен также на основе сопоставления контуров, полученных по серии РЛИ с восходящей и нисходящей орбит.

На *рис. 2* представлены результаты выделения границ участков растрескивания по двум сериям РЛИ. Анализ полученных картин показывает, что положение границ хорошо согласовано на схожих по датам съемки интерферометрических парах.

Рис. 2. Участки растрескивания поверхности лавовых потоков, выделенные на основе значений когерентности по двум сериям РЛИ (с восходящей и нисходящей орбит)

Проведенный анализ свидетельствует о пригодности метода для выделения участков растрескивания поверхности лавовых потоков и о том, что величины просадок лавовых потоков определяются, как правило, с погрешностями менее 2,8 см.

Создание комплексной карты формирования рельефа лавовых потоков. Выполненные выше работы позволили создать комплексную карту формирования поверхности лавовых потоков на разные периоды извержения. В качестве подложки карты выбрана ЦМР SRTM-X, в пределах контуров лавовых потоков приведена суммарная мощность лавовых потоков за период извержения, а также показано положение границ лавовых потоков на даты съемки. Такой набор одновременно отображаемых показателей позволит комплексно проанализировать текущее состояние и развитие процессов формирования поверхности лавовых потоков.

Результаты исследования

Динамика площади лавовых потоков за период извержения

Карта динамики площади лавовых потоков, составленная на основе результатов дешифрирования космических снимков оптического и радиолокационного диапазонов

(рис. 3), дает подробную информацию о периодах активного распространения лавовых потоков и периодах незначительного приращения в площади лавовых потоков.

Рис. 3. Динамика площади лавовых потоков в течение ТТИ-50. Цифрами обозначены даты: 1 – 09.09.2012, 2 – 30.01.2013, 3 – 28.02.2013, 4 – 19.03.2013, 5 – 26.04.2013, 6 – 01.06.2013, 7 – 29.06.2013, 8 – 23.07.2013, 9 – 15.08.2013, 10 – 09.09.2013

Для выявления таких периодов построен график (рис. 4) изменения суммарной площади лавовых потоков в течение ТТИ-50. Полученный график хорошо отражает ключевые события в формировании площади лавовых потоков.

Рис. 4. График изменения суммарной площади лавовых потоков в течение ТТИ-50

На 9 декабря 2012 г. суммарная площадь лавовых потоков составила 23,2 кв.км. За период 9 декабря – 14 февраля площадь лавовых потоков равномерно увеличивалась и на 14 февраля 2013 г. составила 29,8 кв.км. Далее, в период 14 февраля – 19 марта, площадь увеличилась незначительно – прирост составил 0,3 кв.км преимущественно за счет формирования Толудского лавового поля. Однако нельзя исключать, что в этот период могло продолжаться увеличение мощности лавовых потоков. Дальнейшее увеличение суммарной площади лавовых потоков

связано главным образом с формированием Толудского лавового поля. На 19 марта 2013 г. суммарная площадь лавовых потоков составила 30,1 кв.км. В период 19 марта – 26 апреля наблюдалось медленное увеличение площади (на 1,3 кв.км), а затем, в период до 1 июня, существенное увеличение площади – на 3 кв.км, и на 1 июня суммарная площадь потоков составляла 34,5 кв.км. В последующий период суммарная площадь лавовых потоков увеличилась незначительно – на 1,5 кв. км. Итоговая суммарная площадь лавовых полей составила 35,9 кв.км. Таким образом, можно выделить три периода активного роста площади лавовых потоков – бурный рост в начале извержения, стабильный рост в декабре 2012 – феврале 2013 гг. и в мае – июне 2013 г., а также два периода относительной стабилизации – в феврале – апреле и июле – октябре 2013 г.

Комплексная карта формирования поверхности лавовых потоков

Составленная комплексная карта формирования поверхности лавовых потоков (рис. 5) позволяет провести совместный анализ морфометрических характеристик рельефа местности, который был до ТТИ-50, мощности лавовых потоков, пространственного положение просядок и участков растрескивания поверхности лавовых потоков. Такой совместный анализ позволяет установить закономерности в положении участков лавовых потоков с максимальной мощностью относительно исходных эрозионных форм рельефа.

Рис. 5. Пример комплексной карты формирования поверхности лавовых потоков, составленной на основе интерферометрической обработки пары РЛИ 01.06.2013-25.06.2013. Цифрами обозначено: 1 – участки растрескивания поверхности лавовых потоков, 2 – просядки лавовых потоков 10–15 см, 3 – просядки лавовых потоков 5–10 см, 4 – граница Толудского лавового поля на 1 июня 2013 г., 5 – граница Толудского лавового поля на 25 июня 2013 г., 6 – оси раздвиговых магмопроводящих структур

Для анализа результатов был построен ряд профилей по данным SRTM-X, результатам расчета суммарной мощности лавовых просядок и величин просядок. Пример такого набора профилей приведен на рис. 6.

Рис. 6. Анализ изменения рельефа местности после ТТИ-50 на основе серии профилей.
А – расположение построенных профилей. Б – пример набора данных для профиля 4

Анализируя полученные профили можно сделать выводы о том, что развитие лавовых потоков и накопление их мощности происходит по существующим эрозионным врезам, а максимальные значения величин просадок соответствуют участкам с максимальной мощностью.

Выводы

Полученная серия тематических карт ТТИ-50 (карты динамики площади лавовых потоков, комплексные карты формирования поверхности лавовых потоков) позволяет рассматривать радиолокационную интерферометрию как самостоятельный метод картографирования изменения рельефа вулканических областей. Метод позволяет выделять границы лавовых потоков на разных этапах извержения, определять участки растрескивания лавовых потоков, вычислять величины просадок поверхности лавовых потоков. Наличие серии РЛИ с восходящей и нисходящей орбит позволили оценить точность метода и согласованность границ выделенных участков растрескивания поверхности лавовых потоков. Точность определения величин просадок для стабильных участков составила порядка 2–3 см.

С привлечением серии снимков оптического диапазона была получена картина динамики площади лавовых потоков на протяжении всего периода извержения. В результате были выявлены периоды, когда суммарная площадь потоков существенно увеличивалась и периоды, когда продвижение лавовых потоков практически отсутствовало. Однако нельзя исключать, что в такие периоды происходило наращивание мощности лавовых потоков.

Составленная комплексная карта позволяет выполнить совместный анализ эрозионных форм рельефа до извержения, мощности лавовых потоков, величин просадок. В большинстве случаев максимальные мощности лавовых потоков характерны для бывших эрозионных врез, а большие величины просадок – для участков лавовых потоков с максимальными значениями мощности.

Литература

1. Горбач Н.В. Лавовые образования молодого конуса вулкана Шивелуч // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. 2007. С. 108–120.
2. Михайлюкова П.Г., Тутубалина О.В., Мельников Д.В., Зеленин Е.А. Количественная оценка параметров Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН и динамики вулканогенного рельефа на основе данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Том 11. № 4. С. 351–359.
3. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.:КРАСАНД, 2012. 248 с.
4. Borgia A., Linneman Sc., Spenger D., Morales L.D., Andre J.B. Dynamics of lava flow fronts, Arenal volcano, Costa Rica // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1983. No. 19. P. 303–329.
5. Kubanek J., Richardson J.A., Charbonnier S.J., Connor L.J. Lava-flow mapping and volume calculations for the 2012–2013 Tolbachik, Kamchatka, fissure eruption using bistatic TanDEM-X InSAR // Bulletin of Volcanology. 2015. Vol. 77. No. 12. P. 105–118.
6. Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 307. P. 79–88.
7. Massonnet D., Feigl K.L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface // Review of Geophysics. 1998. Vol. 36. No. 4. P. 441–500.

8. Stasiuk M.V., Jaupart C. Lava flow shapes and dimensions as reflections of magma system condition//Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1997. Vol. 78. No. 1. P. 31–50.
9. Stevens N.F., Wadge G., Williams C.A., Morley J.G., Muller J.-P., Murray J.B., Upton M. Surface movements of emplaced lava flows measured by synthetic aperture radar interferometry // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106. No. B6. P. 293–313.
10. Wilson L., Parfit E. The formation of perched lava ponds on basaltic volcanoes: the influence of flow geometry on cooling-limited lava flow lengths//Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1993. Vol. 56. No. 1. P. 113–123.

Mapping of volcanic eruption based on InSAR

P.G. Mikhaylyukova, O.V. Tutubalina

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: p.mikhaylyukova@gmail.com, olgatut@mail.ru

This paper presents results of our study of two-pass differential radar interferometry as an independent method of mapping changes in lava flow topography. The study region is Tolbachinsky Dol (Kamchatka), where a fissure eruption occurred in 2012–2013. Remote sensing data (optical and radar imagery) were regularly acquired during the whole eruption period. Radar imagery was acquired by Radarsat-2 in June – October 2013 from both descending and ascending orbits. These series of radar interferometric pairs, optical imagery, digital elevation model (DEM) and results of fieldwork provide valuable information for complex thematic mapping. A series of thematic maps was created as a result of the study. They show dynamics of lava flow areas and also provide complex maps of lava flow formation. These maps demonstrate the possibility of radar interferometry for thematic mapping topography changes in volcanic regions. We analyzed the method accuracy using two series of radar imagery (from ascending and descending orbits). The comparison showed good agreement between maps based on the processed radar data from different orbits.

Keywords: interferometry, 2012–2013 Tolbachik fissure eruption, lava flow, mapping

Accepted: 18.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-153-163

References

1. Gorbach N.V., Lavovye obrazovaniya molodogo konusa vulkana Shiveluch (Lava formation of Young Shiveluch), *Materialy ezhegodnoi konferentsii, posvyashchennoi dnyu vulkanologa*, 2007, pp. 108–120.
2. Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Radar remote sensing), Moscow: KRASAND, 2012, 248 p.
3. Mikhailyukova P.G., Tutubalina O.V., Mel'nikov D.V., Zelenin E.A., Kolichestvennaya otsenka parametrov Treshchinnogo Tolbachinskogo izverzheniya im. 50-letiya IViS DVO RAN i dinamiki vulkanogennoy rel'efa na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Quantitative assessment of the 2012–2013 Tolbachik fissure eruption based on remote sensing), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 351–359.
4. Borgia, A., Linneman Sc., Spenger D., Morales L.D., Andre J.B., Dynamics of lava flow fronts, Arenal volcano, Costa Rica, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1983, No. 19, pp. 303–329.
5. Kubanek J., Richardson J.A., Charbonnier S.J., Connor L.J. Lava-flow mapping and volume calculations for the 2012–2013 Tolbachik, Kamchatka, fissure eruption using bistatic TanDEM-X InSAR, *Bulletin of Volcanology*, 2015, Vol. 77, No. 12, pp. 105–118.
6. Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, Vol. 307, pp. 79–88.
7. Massonnet D., Feigl K.L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Review of Geophysics*, 1998, Vol. 36, No. 4, pp. 441–500.
8. Stasiuk, M.V., Jaupart C. Lava flow shapes and dimensions as reflections of magma system condition, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1997, Vol. 78, No. 1, pp. 31–50.
9. Stevens N.F., Wadge G., Williams C.A., Morley J.G., Muller J.-P., Murray J.B., Upton M. Surface movements of emplaced lava flows measured by synthetic aperture radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, No. B6, pp. 293–313.
10. Wilson, L., Parfit, E. The formation of perched lava ponds on basaltic volcanoes: the influence of flow geometry on cooling-limited lava flow lengths, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1993, Vol. 56, No. 1, pp. 113–123.