



Analysis of hydraulic gradient variation according to topographic gradient and rainfall in unconfined aquifer

Kim, Byung-Woo^a · Kang, Dong-hwan^{b*} · Jo, Won Gi^c · Park, Kyoung-deok^d

^aPrincipal Researcher, K-water Research Institute, K-water Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

^bResearch Professor, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan, Korea

^cAssociate Researcher, National Greenhouse Gas Inventory and Research Center, Cheongju, Korea

^dFull-time Researcher, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan, Korea

Paper number: 23-050

Received: 24 August 2023; Revised: 4 October 2023; Accepted: 4 October 2023

Abstract

In this study, two sections with different topographic gradients were in the Hyogyo-ri area, the hydraulic gradients were calculated for each section, and the hydraulic gradient fluctuations according to the topographic gradient and rainfall were analyzed. The variations of the hydraulic gradient within the research site was large in the section with steep topographic gradient and small in the section with gradual topographic gradient. The influence of the variation in hydraulic gradient due to rainfall was high in the section with steep topographic gradient, and low in the section with gradual topographic gradient. Through this study, it was found that the hydraulic gradient fluctuations in unconfined aquifer showed as a complex effect of topographic gradient and rainfall.

Keywords: Unconfined aquifer, Hydraulic gradient, Topographic gradient, Rainfall

자유면 대수층에서 지형 경사와 강우를 고려한 수리경사 변동 분석

김병우^a · 강동환^{b*} · 조원기^c · 박경덕^d

^a한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원, ^b부경대학교 지질환경연구소 연구교수, ^c온실가스종합정보센터 전문연구원,

^d부경대학교 지질환경연구소 전임연구원

요 지

본 연구에서는 효교리 지역에서 지형 경사가 다른 2개 구간을 설정하여 구간별 수리경사를 산정하고 지형 경사와 강우에 따른 수리경사 변동을 분석하였다. 연구부지 내 모든 지하수공에서 강우량이 증가할수록 지하수위가 상승하는 것으로 나타났으며, 지하수위 상승량은 지하수공의 고도가 높을수록 작았다. 연구부지 내 수리경사의 변동은 지형 경사가 급한 구간에서는 크고 지형 경사가 완만한 구간에서는 작았다. 강우에 의한 수리경사 변동은 지형 경사가 급한 구간에서는 강우에 의한 영향성이 높았으며, 지형 경사가 완만한 구간에서는 강우에 의한 영향성이 낮았다. 본 연구를 통해 자유면 대수층에서 수리경사 변동은 지형 경사와 강우에 의한 복합적인 영향으로 나타남을 알 수 있었다.

핵심용어: 자유면 대수층, 지하수위, 지형 경사, 강우, 수리경사

1. 서 론

지하수 수리경사(hydraulic gradient)는 지하수의 유동과 오염물질의 확산에 지배적인 영향을 미치는 중요한 인자이다

(Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2019). 수리경사는 지하수위가 높은 지역에서 낮은 지역으로 형성되고, 수리경사가 클수록 지하수 유속과 유량이 증가한다(Hahn *et al.*, 1998; Devlin and McElwee, 2007).

수리경사를 산정한 연구는 고지대와 저지대, 육지와 해안 등 다양한 환경에서 수행되었다(Serfes, 1991; Bosch *et al.*,

*Corresponding Author. Tel: +82-51-629-6620
E-mail: dhkang@pknu.ac.kr (Kang, Dong-hwan)

1996; Cole andn Silliman, 1996; Devlin, 2003; McKenna and Wahi, 2006; Kim et al., 2009; Rau et al., 2019; McDonald, 2021; Park et al., 2023). 조석의 영향을 받는 해안대수층에서는 지하수위의 상승과 하강이 반복되고, 이로 인해 수리경사도 주기적으로 변동하게 된다(Serfes, 1991; Kim et al., 2009). 조석의 영향을 받지 않는 자유면 대수층 내 지하수 수리경사는 지형 경사에 지배적인 영향을 받는다(Hahn et al., 1998). 강우 발생 시에는 지형 경사가 급할수록 수리경사의 변동 폭이 크고, 이는 강우가 발생하면 고지대보다 저지대의 지하수위 상승 폭이 높아져서 수리경사가 감소하기 때문이다(Bosch et al., 1996; Park et al., 2023). 지형 경사가 급한 지역의 자유면 대수층에서는 고도가 다른 두 지하수공의 지하수위 차를 이용하여 수리경사를 산정하고(Hahn et al., 1998), 지형 경사가 완만한 평지 지역의 자유면 대수층에서는 3개 이상의 지하수공에서 관측된 지하수위 자료를 이용한 평면방향식으로 수리경사를 산정한다(Cole andn Silliman, 1996; Devlin, 2003; McKenna and Wahi, 2006; Rau et al., 2019; McDonald, 2021).

기존 연구에서는 단일 지형 경사 조건의 자유면 대수층에서 지하수위 관측 자료를 이용하여 Devlin (2003)이 제시한 방법을 적용하여 수리경사를 산정하고 강우의 영향에 의한 지하수위와 수리경사의 변동 특성을 분석하였다(Park et al., 2023). 동일 지역에서도 지형 경사 조건이 다른 구간이 존재하고 이를 고려한 수리경사의 변동 분석 연구가 필요하므로, 수리경사 변동에 지배적인 영향을 미치는 지형 경사(급경사지와 완경사지)와 실시간 강우량의 변화를 고려한 수리경사를 산정하여 수리경사의 시공간 변동 특성을 종합적으로 해석해야 한다.

본 연구에서는 효교리 마을에서 2020년 1월 1일부터 12월 31일까지 1개 지점의 AWS (Automatic Weather Station)와 3개 지점의 지하수공을 설치하여 강우와 지하수위를 관측하였으며, 강우와 지하수위의 계절 변동을 파악하고 지형 경사가 다른 2개 구간(L1과 L2)에서 강우에 의한 수리경사 변동 특성을 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 충청남도 예산군 봉산면 효교리 마을에서 수행되었으며, AWS 및 지하수공을 설치하여 강우량과 지하수위를 1년 동안 관측하였다(Fig. 1). 연구부지 내 강우량 관측은 1개 지점(AWS)에서, 지하수위 관측은 3개 지점(MW1, MW2, MW3)에서 수행되었다. 강우량은 1분 간격으로 지하수위는 10분 간격으로 측정하였으며, 관측 자료는 1개월마다 현장에서 수집하여 정리하였다(Park et al., 2023). 지하수공의 해발

고도는 MW1은 23.7 m, MW2는 17.6 m, MW3은 13.3 m 정도이다. 지하수공 사이의 지형 경사는 L1 구간(MW1과 MW2 지하수공)에서 0.044 정도로 급하고, L2 구간(MW2와 MW3 지하수공)에서는 0.012 정도로서 완만하였다. 연구부지의 규모는 680 m × 450 m, 지하수공 사이의 이격거리는 L1 구간(급경사지)에서 140 m, L2 구간(완경사지)에서는 370 m 정도이었다. 연구부지 내 3개 지하수공 개발 시에 시추조사가 수행되었으며, 지층 구성과 두께는 봉적층 또는 충적층은 2.4~4.4 m, 풍화토는 4.7~14.6 m, 풍화암은 21.7~31.0 m 정도이고, 그 하부는 연암(기반암)으로 분포하고 있다(Park et al., 2023).

자유면 대수층(unconfined aquifer)은 지하수면(groundwater table)이 상부 경계이고 대수층 하부에는 불투수층이 존재한다. 자유면 대수층 내 지하수는 대부분 강우와 지표수에 의해 직접 함양되고, 대수층 매질은 다공성 토양층으로 구성되어 있다(Hahn et al., 1998). 자유면 대수층에서 지하수 유동은 지형 경사에 지배적인 영향을 받으며, 지하수위의 차에 의한 수리경사에 의해 발생한다. 자유면 대수층 내 지하수의 수리경사는 위치수두(elevation head) 차에 의해 크기와 방향이 결정되고, 자유면 대수층을 구성하는 매질은 대부분 토양층으로 구성되어 있다(Kim et al., 2009). 다공성 매질로 구성된 자유면 대수층에서의 지하수 유동은 다르시 법칙으로 설명할 수 있으며, 다르시 법칙에서 지하수 유량은 수리전도도와 수

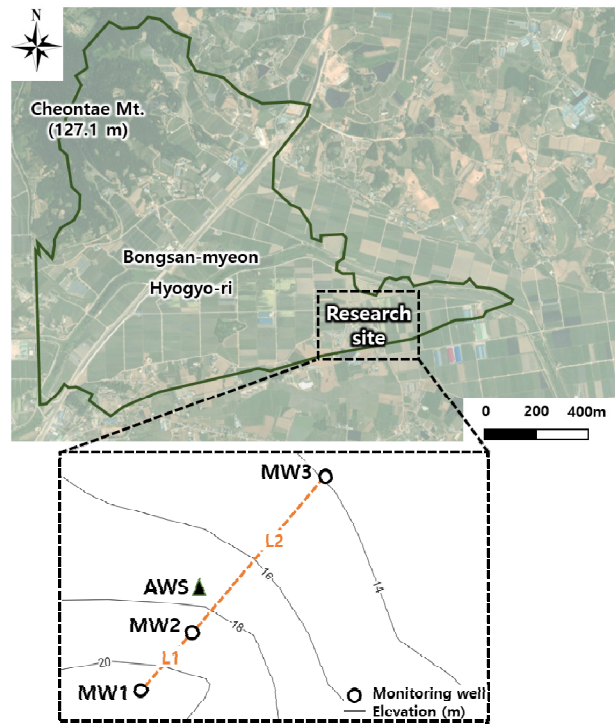


Fig. 1. Location map of research site and monitoring points

리경사에 따라 변동한다(Eq. (1)).

$$Q = -K_i A \quad (1)$$

여기서 Q 는 자유면 대수층 내 지하수 유량 [$L^3 T^{-1}$], K 는 대수층 매질의 수리전도도 [$L T^{-1}$], i 는 수리경사, A 는 지하수가 통과하는 대수층의 단면적 [L^2]에 해당한다. 자유면 대수층에서의 지하수 유량은 수리전도도와 수리경사에 지배적인 영향을 받고 있으며, 대수층 매질의 수리전도도는 일정하지만 수리경사는 강우와 양수 등에 의해 변동한다. 자유면 대수층에서는 강우에 의한 지하수위 상승 혹은 양수에 의한 지하수위 강하로 인해 대수층 매질의 영역이 달라지므로 수리경사가 변동하게 된다(Bosch *et al.*, 1996; Park *et al.*, 2023). 본 연구에서는 강우에 의한 수리경사의 변동을 정량적으로 산정하기 위해 지하수위를 이용하였으며, 동일한 자유면 대수층에서 지형 경사가 다른 2개 구간(급경사지와 완경사지)에서 지하수 수리경사를 산정하였다. 자유면 대수층에서 지하수의 수리경사는 아래의 Eq. (2)에 의해 산정된다.

$$\text{Hydraulic gradient}(m/m) = (h_1 - h_2)/L \quad (2)$$

여기서 h_1 과 h_2 는 각각 상류부와 하류부에 위치한 지하수공 내 지하수위 [L], L 은 지하수공 사이의 거리 [L]에 해당한다.

3. 결과 및 고찰

연구부지 내 지하수공의 일별 지하수위 변동량을 이용하

여 지형 경사가 다른 2개 구간(L1과 L2)에서 일별 수리경사를 산정하였다(Fig. 2). 연구부지 내 지형 경사별 수리경사의 범위는 L1 구간에서는 0.007~0.017, L2 구간에서는 0.004~0.008로서 L1 구간이 L2 구간보다 2배 정도 높게 나타났다. 지형 경사가 급한 L1 구간이 L2 구간보다 수리경사가 모든 시기 동안 더 높게 나타났으며, 이는 수리경사가 지형 경사에 의해 지배적인 영향을 받음을 의미한다(Hahn *et al.*, 1998). 강우량에 따른 수리경사의 변동은 L1 구간이 L2 구간보다 더욱 민감하게 반응하였으며, 이는 지형 경사가 L2 구간에 비해 2.5배 이상인 L1 구간에서 강우 발생 시 MW1과 MW2 사이에서 지하수의 유출과 유입이 빠르게 발생하므로 강우에 의한 MW1과 MW2 사이의 수리경사 변동량의 민감도가 높았기 때문이다. L1 구간에서는 강우량이 증가할수록 수리경사가 낮아지는 경향을 보였으며, 기존의 연구에서도 강우량이 많은 시기에는 수리경사가 낮고 강우량이 적은 시기에는 수리경사가 높았다(Bosch *et al.*, 1996; Park *et al.*, 2023).

연구부지 내 2개 구간에서 월별 수리경사의 상자수염그림을 작성하여 월별 수리경사 변동 폭을 분석하였다(Fig. 3). 월별 수리경사의 변동 폭은 L1 구간보다 L2 구간에 적었으며, 이는 지형 경사의 영향으로 판단된다. L1 구간에서 수리경사의 변동 폭은 5월과 8~9월에 크게 나타났으며, 이 시기에는 강우 일수와 강우량이 많았다. L1 구간에서는 강우량이 많았던 6~7월에 수리경사의 변동 폭은 작았으며, 이는 5월부터 많은 강우량으로 인해 자유면 대수층에서의 지하수위가 안정화되어 수리경사의 변동 폭이 크지 않았던 것으로 판단된다. 수리경사가 가장 낮게 형성된 시기는 L1 구간에서는 7월이고 L2 구간에서는 6월이었다. 본 연구부지에서 수리경사의 변동 폭은 L1과 L2 구간 모두에서 봄과 여름이 가을과 겨울보다 크게

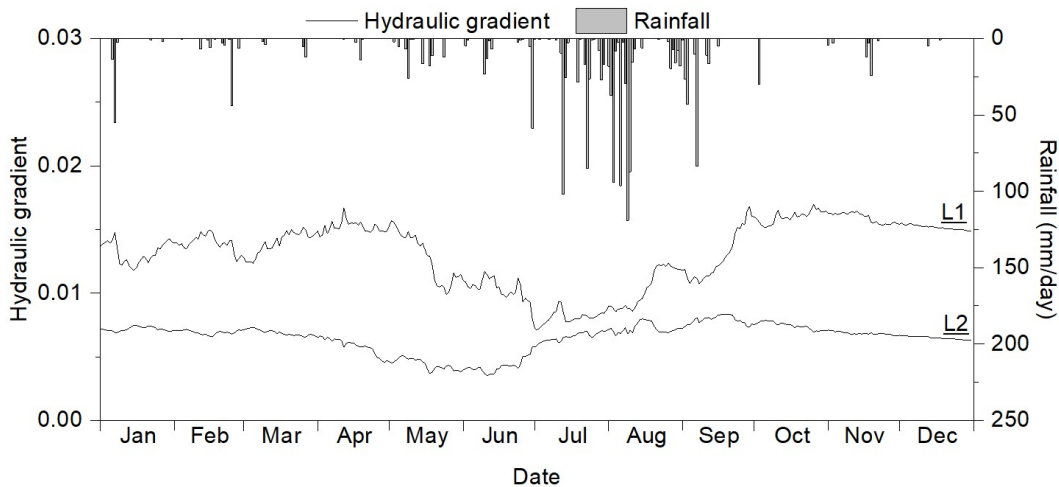


Fig. 2. Time series graphs of daily accumulated rainfall and hydraulic gradient in the research site

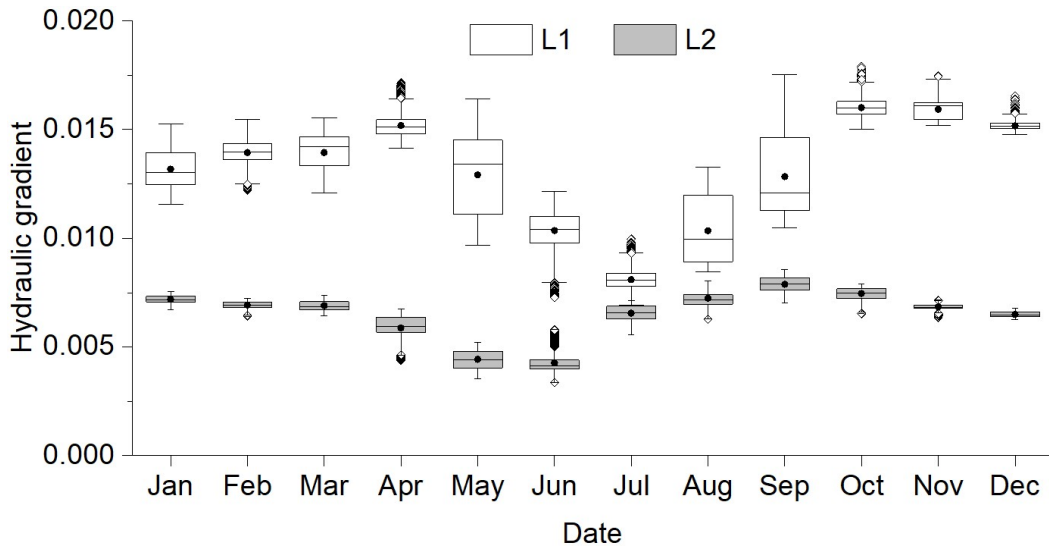


Fig. 3. Box whisker plots of hydraulic gradient by monthly in the research site

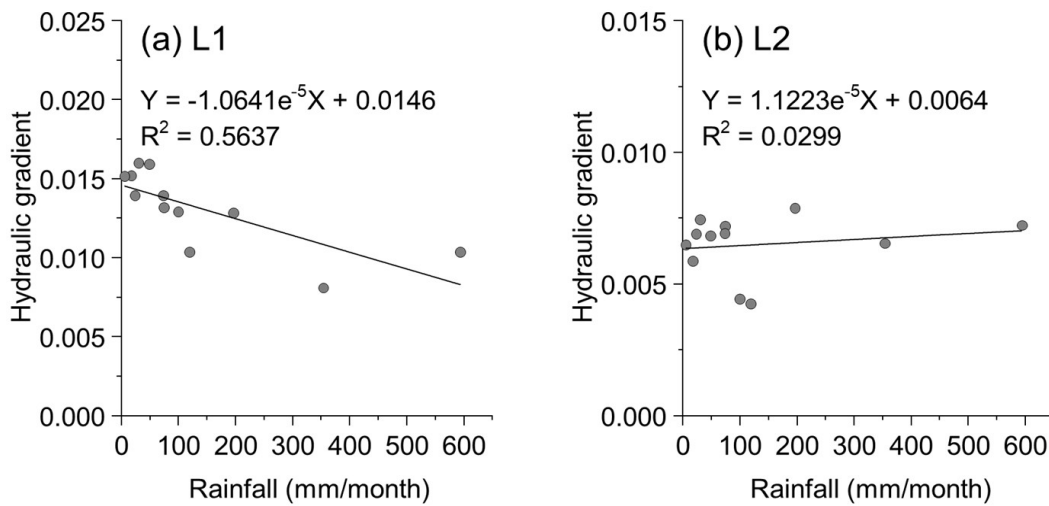


Fig. 4. Regression functions of monthly average hydraulic gradient according to monthly accumulated rainfall in the research site

나타났다. 본 연구부지에서 수리경사의 변동 폭은 강우 일수와 강우량에 지배적인 영향을 받고 있으며, 지속적인 강우 이후에는 자유면 대수층의 지하수위 상승률이 감소하여 수리경사의 변동 폭이 작아지는 것으로 나타났다.

월 누적 강우량에 따른 월평균 수리경사 회귀함수를 작성하였으며, L1 구간에서는 강우량이 증가할수록 월평균 수리경사가 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 4). 월 누적 강우량에 따른 월평균 수리경사 회귀함수의 결정계수는 L1 구간에서는 0.5637, L2 구간에서는 0.0299 정도로 나타났다. 회귀함수의 기울기는 L1 구간에서 음의 값으로서 월 누적 강우량이 증가할수록 월평균 수리경사는 낮아지는 경향을 보였다. 본 연구부지 내 수리경사는 지형 경사가 급한 경우(L1 구간)에는 강

우에 의해 지배적인 영향을 받고 있으며, 지형 경사가 완만한 경우(L2 구간)에는 강우에 의한 영향성이 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 동일한 자유면 대수층에서도 지형 경사와 강우에 의한 수리경사 변동이 다양하게 나타남을 확인하였으며, 강우량이 동일한 경우에도 지형 경사가 급할수록 수리경사의 변동 폭이 크게 나타났다.

강우에 의한 수리경사 변동 분석에 의하면, 강우 일수와 강우량이 많은 여름에는 수리경사가 낮아지고 강우 일수와 강우

량이 적은 겨울에는 수리경사가 높았다. 자유면 대수층 내 지하수의 수리경사는 강우에 의한 영향성이 직접적이고 계절적인 변화가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 자유면 대수층 내 지하수 수리경사는 지형 경사와 강우에 의한 영향이 복합적으로 나타남을 알 수 있었으며, 향후에는 동일 수계에서 다양한 강우 유형별 수리경사의 변동 특성을 연구하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 K-water 과제 “낙동강하구 염지하수의 연직 프로파일링 기술 시범 적용 연구(과제번호: G220571)”의 일환으로 수행되었으며, 또한 국립환경과학원의 농축산지역 지하수 중 질산성질소 수질관리 개선사업(V)의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2020-04-02-052).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bosch, D.D., Sheridan, J.M., and Lowrance, R.R. (1996). “Hydraulic gradients and flow rates of a shallow coastal plain aquifer in a forested riparian buffer.” *Transactions of the ASAE*, Vol. 39, No. 3, pp. 865-871.
- Cole, B.E., and Silliman, S.E. (1996). “Estimating the horizontal gradient in heterogeneous, unconfined aquifers: Comparison of three-point schemes.” *Groundwater Monitoring & Remediation*, Vol. 16, No. 2, pp. 84-91.
- Devlin, J.F. (2003). “A spreadsheet method of estimating best-fit hydraulic gradients using head data from multiple wells.” *Groundwater*, Vol. 41, No. 3, pp. 316-320.
- Devlin, J.F., and McElwee, C.D. (2007). “Effects of measurement error on horizontal hydraulic gradient estimates.” *Groundwater*, Vol. 45, No. 1., pp. 62-73.
- Hahn, J.S. (1998). *Groundwater environment and pollution*, Pakyoungsa, pp. 107-111.
- Kim, T.Y., Kang, D.H., Kim, S.S., and Kwon, B.H. (2009). “Variation characteristics of hydraulic gradient and major flow direction in the landfill soils.” *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 18, No. 3, pp. 315-323.
- McDonald, J.P. (2021). “Measuring a low horizontal hydraulic gradient in a high transmissivity aquifer.” *Groundwater*, Vol. 59, No. 5, pp. 694-709.
- McKenna, S.A., and Wahi, A. (2006). “Local hydraulic gradient estimator analysis of long-term monitoring networks.” *Groundwater*, Vol. 44, No. 5, pp. 723-731.
- Park, K.D., Kang, D.H., Jo, W.G., Shin, I.K., Oh, Y.Y., Kim, M.S., and Kim, H.K. (2023). “Seasonal variation of hydraulic gradient according to rainfall in unconfined aquifer: Hyogyo-ri.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 32, No. 5, pp. 303-313.
- Rau, G.C., Post, V.E.A., Shanafield, M., Krekeler, T., Banks, E.W. and Blum, P. (2019). “Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: A quantitative appraisal.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, No. 9, pp. 3603-3629.
- Serfes, M.E. (1991). “Determining the mean hydraulic gradient of ground water affected by tidal fluctuations.” *Groundwater*, Vol. 29, No. 4, No. 549-555.
- Wang, C., Wang, B., Wang, Y., Wang, Y., Zhang, W., and Yan, Y. (2019). “Impact of near-surface hydraulic gradient on the interrill erosion process.” *European Journal of Soil Science*, Vol. 71, No. 4, pp. 598-614.
- Zhang, Y., Cao, W., Wang, W., and Dong, Q. (2013). “Distribution of groundwater arsenic and hydraulic gradient along the shallow groundwater flow-path in Hetao Plain, Northern China.” *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 135, pp. 31-39.