**Дополнительные материалы**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ**

**БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ТЕННАНТИТА И ЭНАРГИТА УМЕРЕННО-**

**ТЕРМОФИЛЬНЫМИ АЦИДОФИЛЬНЫМИ МИКРООРГАНИЗМАМИ1**

**© 2020 г. Ю. А. Елкина\*,\*\*,#, Е. А. Мельникова\*\*, В. С. Меламуд\*\*, А. Г. Булаев\*,\*\***

*\*Биологический факультет, Московский государственный университет им. М.В.*

*Ломоносова, Москва, Россия*

*\*\*Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия*

#E-mail: [yollkina@mail.ru](mailto:yollkina@mail.ru)

ТАБЛИЦЫ

Таблица S1. Состав популяций ацидофильных микроорганизмов в реакторах чанового биоокисления концентратов сульфидных руд

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Основные  сульфидные минералы,  представленные в  концентрате | Температура,  °C | Состав микробной популяции | Ссылка |
| Пирит,  халькопирит,  сфалерит | 45 | *Acidithiobacilllus caldus,*  *Leptospirillum ferriphilum,, Sulfobacillus* sp., *Ferroplasma* sp. | Okibe et al., 2003 |
| Пирит,  арсенопирит,  халькопирит | 45 | *A. caldus, S.*  *thermosulfidooxidans,*  *“Sulfobacillus montserratensis”* | Dopson, Lindstrom,  2004 |
| Пирит | 42 | *L. ferriphilum, A. caldus, F.*  *acidiphilum, S. benefaciens* | Morin, d’Hugues, 2007 |
| Пирит, арсенопирит | 40–50 | *Sulfobacillus* sp., *A. caldus,*  *L. ferriphilum, Ferroplasma* sp., *Acidiplasma* sp. | van Hille et al., 2011, van Hille et al., 2013 |
| Пирит, арсенопирит | 45 | *A. caldus, S.*  *thermosulfidooxidans, Acidiplasma* sp. | Muravyov, Bulaev, 2013 |
| Пирит,  халькопирит, теннантит,  сфалерит | 40 | *A. caldus, S. benefaciens, F. acidiphilum, Cuniculiplasma divulgatum* | Bulaev et al, 2020 |

РИСУНКИ

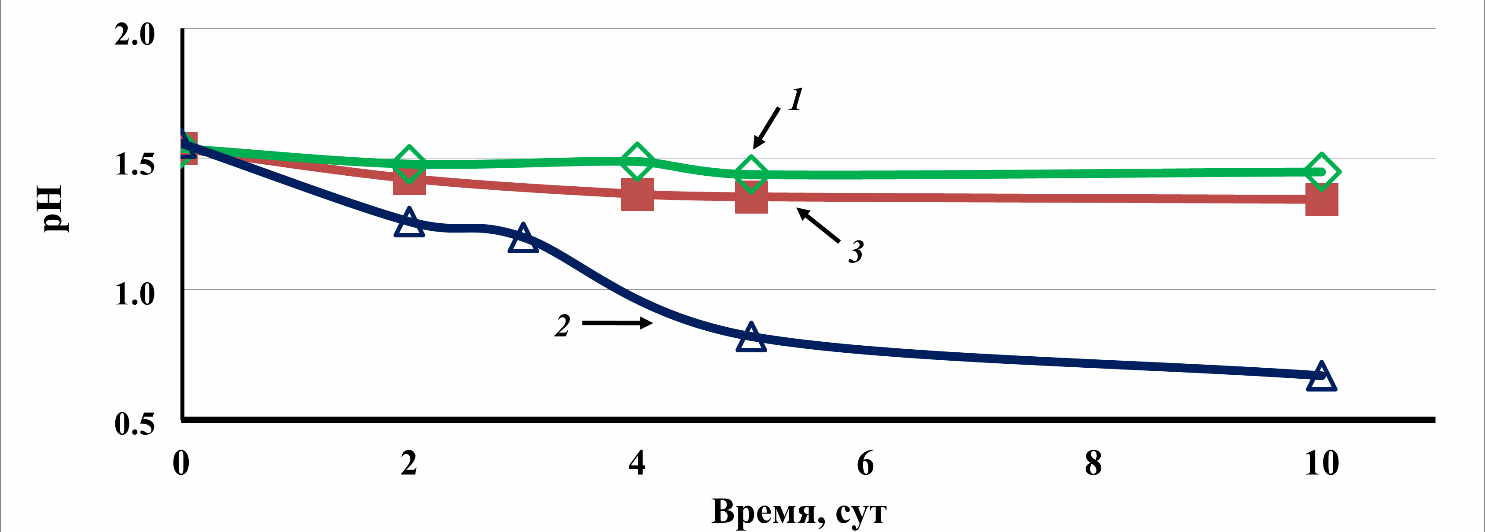


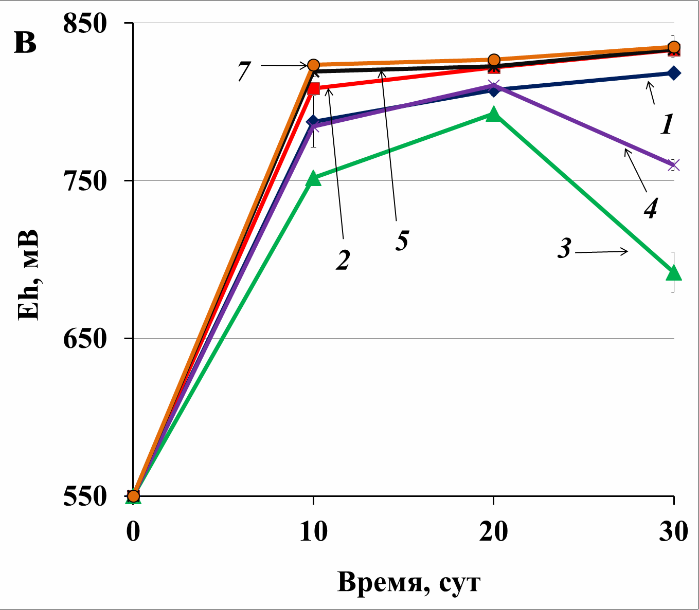
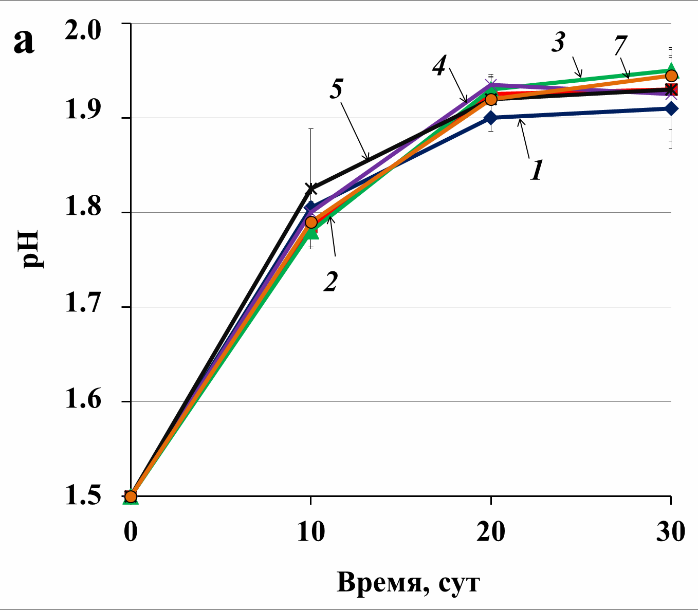
Рис. S1. Изменение pH среды при окислении элементарной серы штаммами микроорганизмов, которые были использованы в работе. Варианты эксперимента: 1 – чистая культура *S. thermosulfidooxidans* SH-1; 2 – чистая культура *A. caldus* MBC-1; 3 – чистая культура *Acidiplasma sp.* MBA-1. Условия эксперимента: для проведения экспериментов была использована жидкая питательная среда, содержащая минеральные соли (г/л): (NH4)2SO4 – 3.0, KCl – 0.2, MgSO4 × 7H2O –

0.5, K2HPO4 – 0.5, в среду также добавляли 0.02% дрожжевого экстракта; опыты проводили в колбах

со 100 мл питательной среды и 2 г элементарной серы (200 об./мин) в течение 10 суток при температуре, оптимальной для каждого штамма (50°C для *S. thermosulfidooxidans* SH-1, 45°C для *A. caldus* MBC-1 и 50°C для *Acidiplasma sp.* MBA-1).



Рис. S2. Изменение параметров жидкой фазы в процессе биовыщелачивания халькопирита: (а) и (б) − pH; (в) и (г) − Eh; (д) и (e) − концентрация ионов Fe3+ в среде; (ж) и (з) − суммарная концентрация ионов Fe3+ и Fe2+в среде; варианты эксперимента: 1 – чистая культура *S. thermosulfidooxidans* SH-1,



45°C; 2 – чистая культура *A. caldus* MBC-1, 45°C; 3 – чистая культура *Acidiplasma sp.* MBA-1, 45°C; 4

– *S. thermosulfidooxidans* SH-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 5 – *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1,

45°C; 6 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 40°C; 7 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 8 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 50°C; 9 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 55°C; 10 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 60°C.

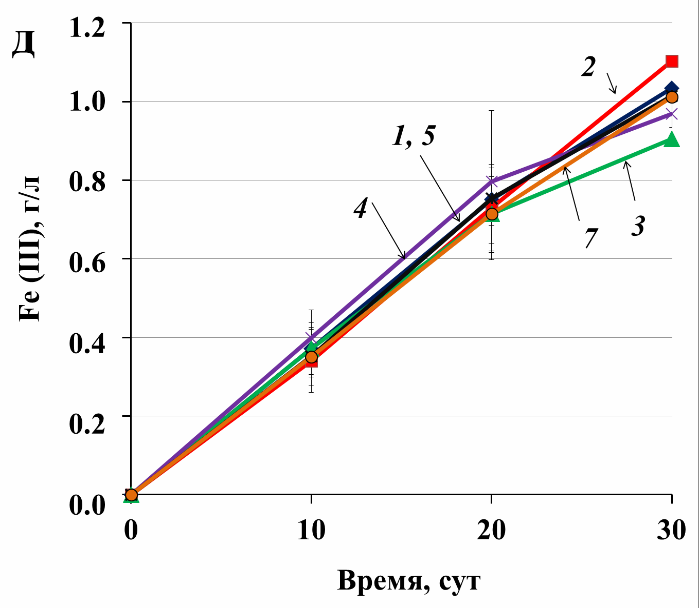
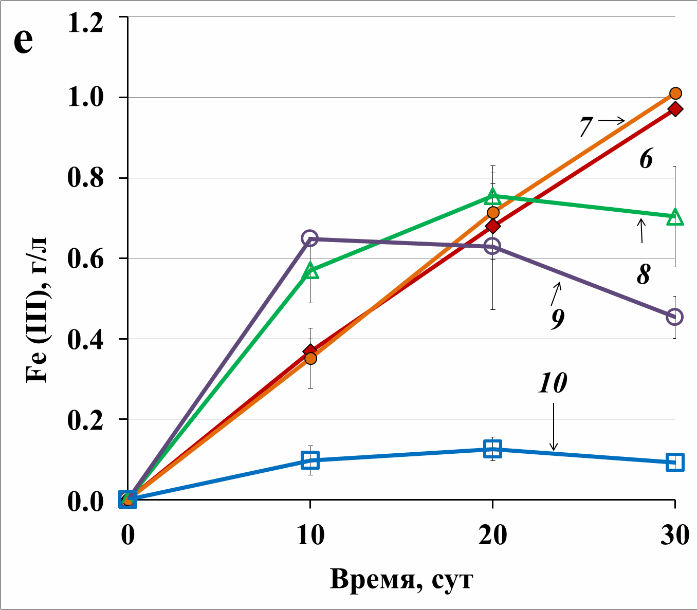
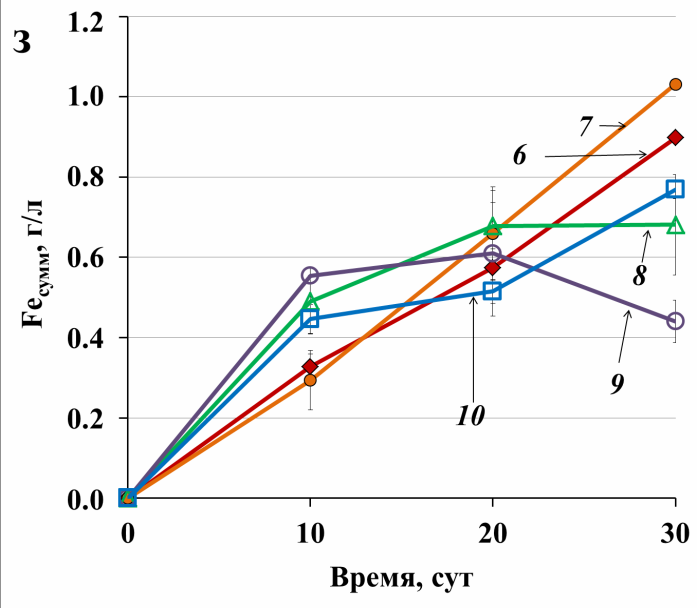
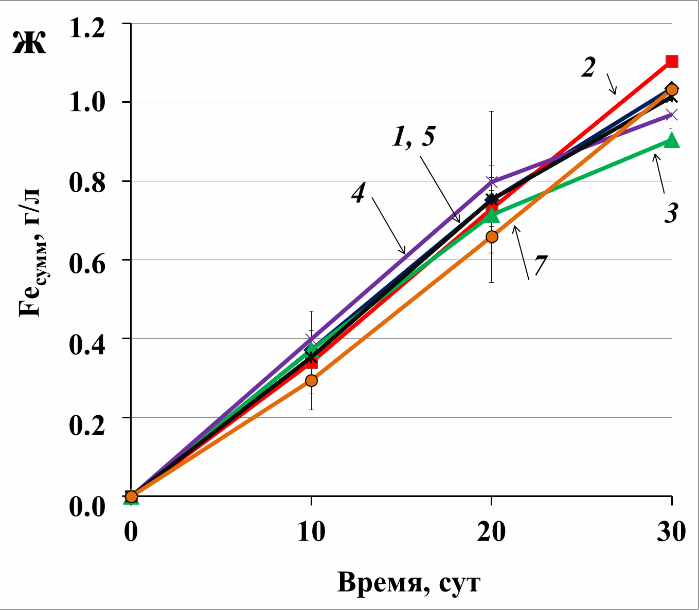


Рис. S2 (*продолжение*). Изменение параметров жидкой фазы в процессе биовыщелачивания халькопирита: (а) и (б) − pH; (в) и (г) − Eh; (д) и (e) − концентрация ионов Fe3+ в среде; (ж) и (з) − суммарная концентрация ионов Fe3+ и Fe2+в среде; варианты эксперимента: 1 – чистая культура *S. thermosulfidooxidans* SH-1, 45°C; 2 – чистая культура *A. caldus* MBC-1, 45°C; 3 – чистая культура *Acidiplasma sp.* MBA-1, 45°C; 4 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 5 – *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 6 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 40°C; 7 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 8 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 50°C; 9 – *S.*



*thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 55°C; 10 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 60°C.

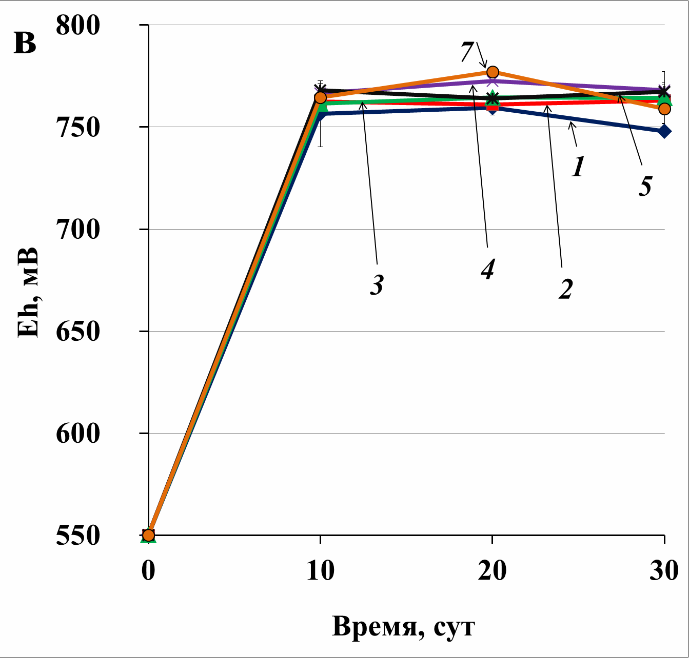
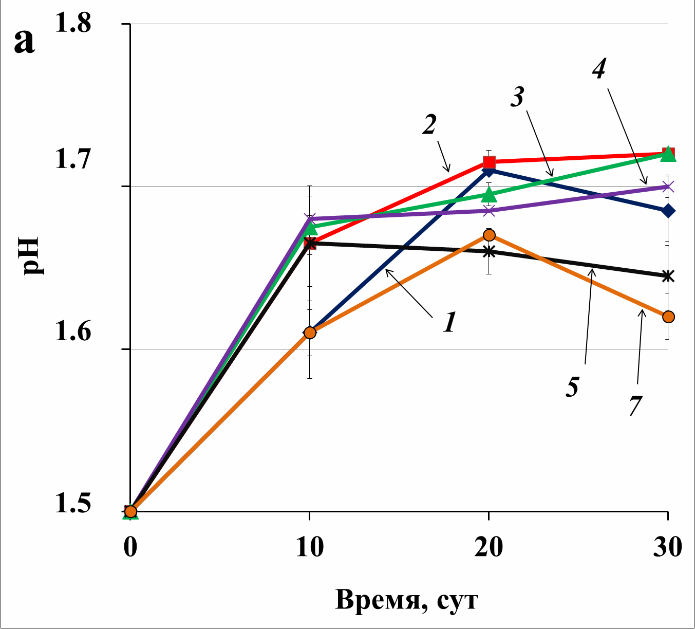
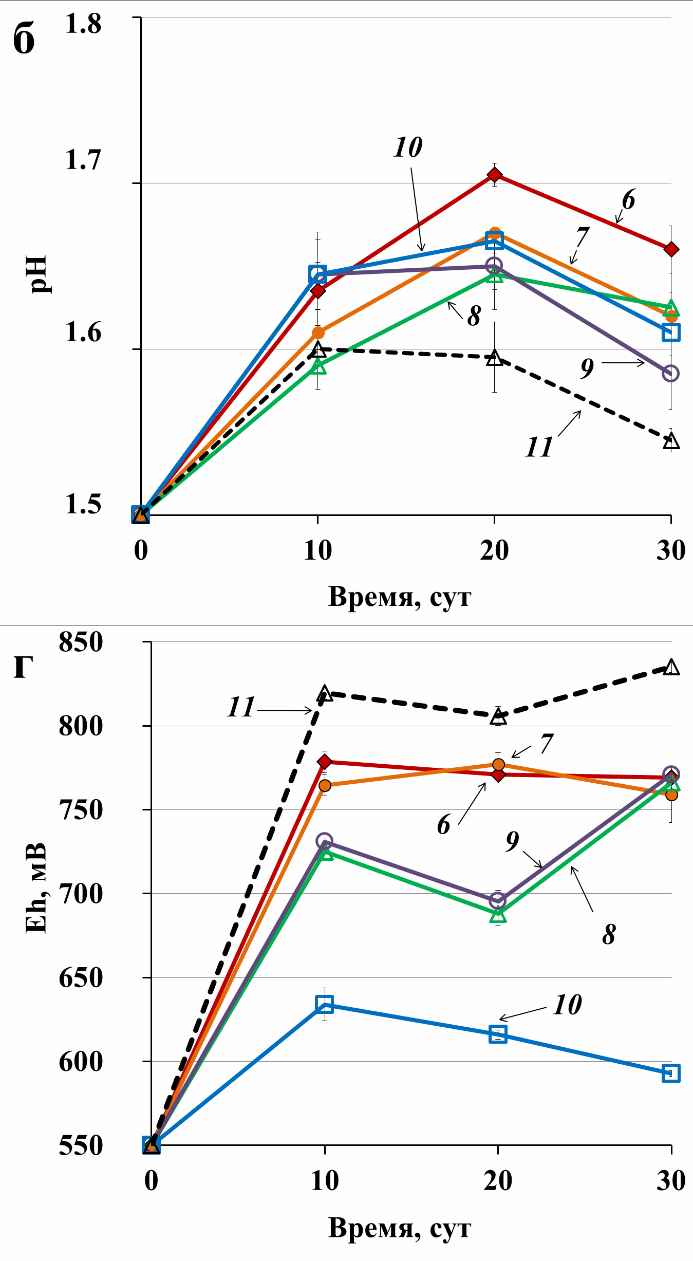
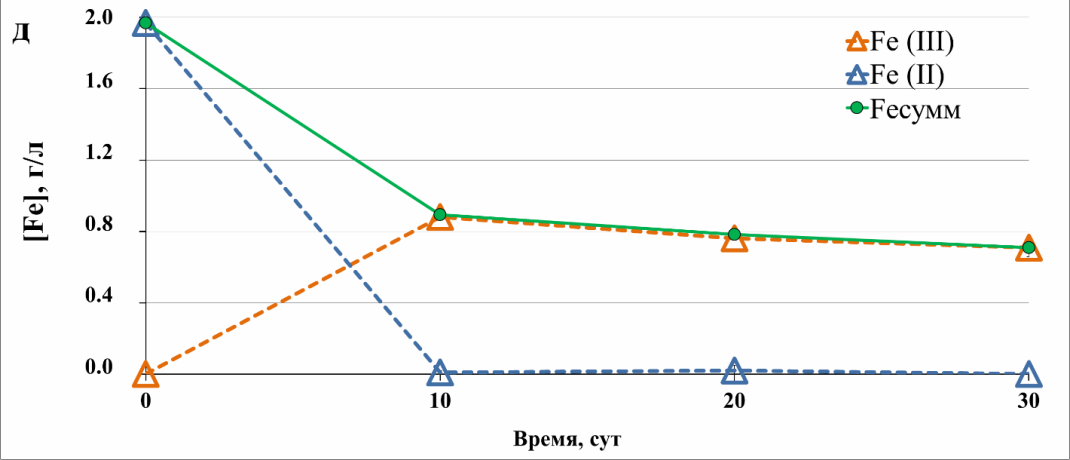


Рис. S3. Изменение параметров жидкой фазы в процессе биовыщелачивания энаргита: (а) и (б)

− pH; (в) и (г) − Eh; (д) концентрации ионов Fe3+ и Fe2+ в среде при проведении эксперимента со средой, содержащей 35 мМ Fe2+; варианты эксперимента: 1 – чистая культура *S. thermosulfidooxidans* SH-1, 45°C; 2 – чистая культура *A. caldus* MBC-1, 45°C; 3 – чистая культура

*Acidiplasma sp.* MBA-1, 45°C; 4 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 5 – *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 6 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 40°C; 7 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 8 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1,

50°C; 9 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 55°C; 10 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 60°C; 11 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 50°C, среда с 35 мМ Fe2+.

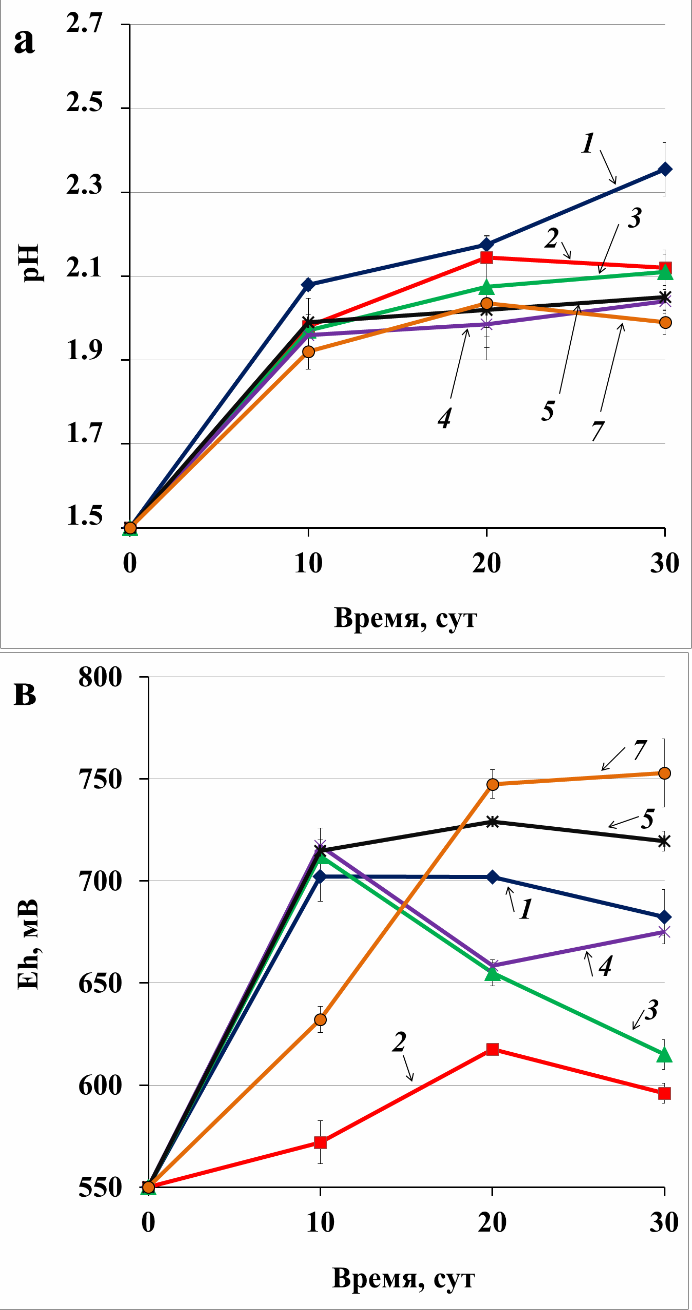
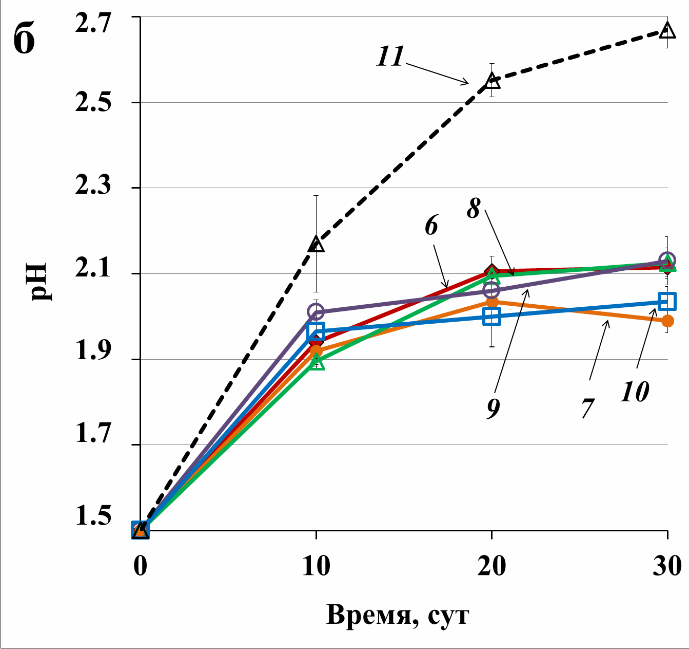
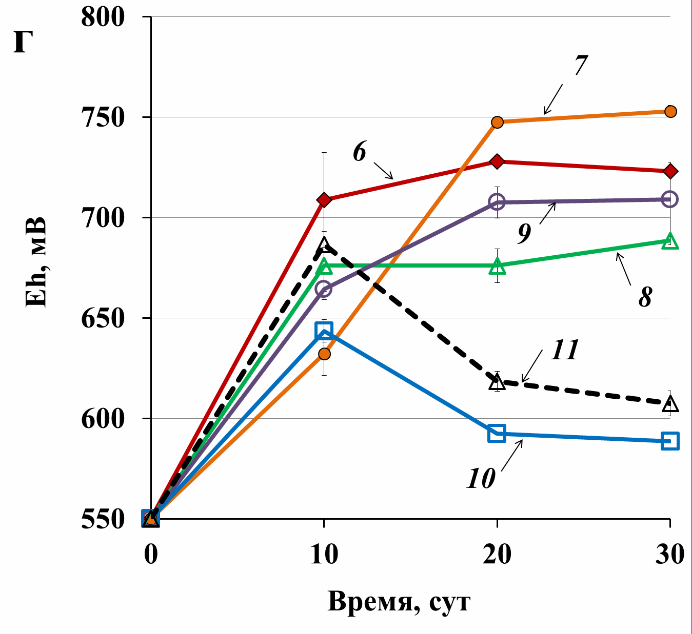
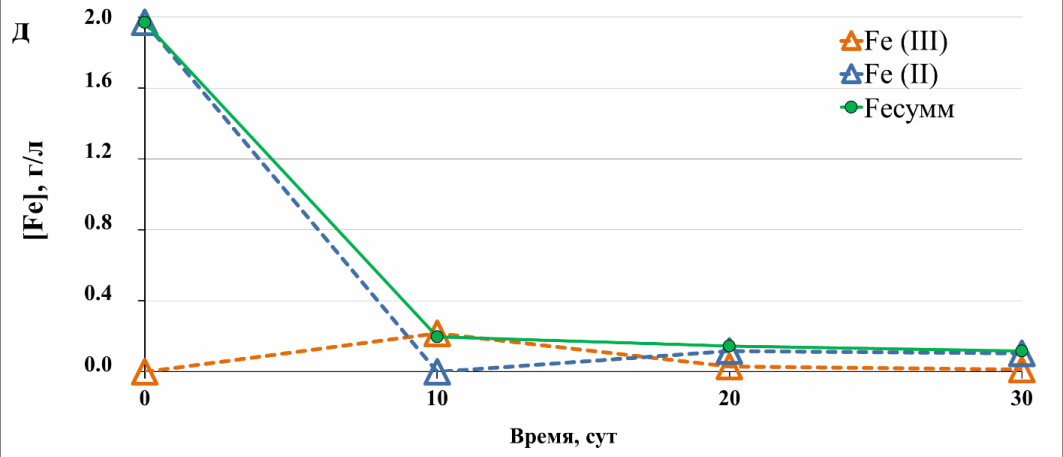


Рис. S3. Изменение параметров жидкой фазы в процессе биовыщелачивания теннантита: (а) и (б) − pH; (в) и (г) − Eh; (д) концентрации ионов Fe3+ и Fe2+ в среде при проведении эксперимента со средой, содержащей 35 мМ Fe2+; варианты эксперимента: 1 – чистая культура *S. thermosulfidooxidans* SH-1, 45°C; 2 – чистая культура *A. caldus* MBC-1, 45°C; 3 – чистая культура *Acidiplasma sp.* MBA-1, 45°C; 4 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1 и *A. caldus* MBC-1,

45°C; 5 – *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 6 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 40°C; 7 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 45°C; 8 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 50°C; 9 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1,

55°C; 10 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 60°C; 11 – *S. thermosulfidooxidans* SH-1, *Acidiplasma sp.* MBA-1 и *A. caldus* MBC-1, 50°C, среда с 35 мМ Fe2+.